

KARELIA AMMATTIKORKEAKOULU
Kone- ja tuotantotekniikan koulutusohjelma

Harri Justander

HÖYRYTURBIINEIDEN RAKENTEELLISET RATKAISUT JA
SUUNNITTELUPERUSTEET

Opinnäytetyö
Huhtikuu 2016



OPINNÄYTETYÖ

Huhtikuu 2016

Kone- ja tuotantotekniikan koulutusohjelma

Karjalankatu 3

80200 JOENSUU

p. (013) 260 6800

Tekijä(t)

Harri Justander

Nimeke

Höyryturbiinien rakenteelliset ratkaisut ja suunnitteluperusteet

Toimeksiantaja

Harri Justander

Tiivistelmä

Tämän opinnäytetyön tavoitteena oli perehtyä höyryturbiinien toimintaperiaatteisiin, rakenteisiin, konetekniisiin suunnitteluperusteisiin ja materiaalitekniisiin vaatimuksiin sekä toimia turbiinitekniikan perusteiden oppimateriaalina.

Työn toteutusta varten kerättiin laaja ja monipuolinen teoreettinen tietomäärä turbiinitekniikasta sekä tutustuttiin höyryturbiinin toimintaan voimalaitosympäristössä. Tästä aineistosta laadittiin raportti, jossa tarkastellaan höyryturbiinien toimintaperiaatteita, turbiiniprosessia voimalaitosympäristössä ja turbiinien erilaisia osia sekä näiden keskeisimpiä suunnitteluperusteita. Työssä käsiteltiin myös värähtelymekaanisia näkökulmia ja materiaalin vauriomekanismeja höyryturbiineissa.

Aihepiirin laajuus edellytti rajaamaan esitettyä asiasisältöä. Tässä työssä pystyttiin esittämään ainoastaan keskeisimpien osa-alueiden tärkeimmät perusteet. Rajauksesta huolimatta raportista tuli onnistunut johdatus turbiinitekniikkaan koneteknisestä näkökulmasta.

Kieli
suomi

Sivuja 71

Asiasanat

höyryturbiini, energiatekniikka, konetekniikka

**THESIS****April 2016****Degree Programme in Mechanical and
Production Engineering**

Karjalankatu 3

FI 80200 JOENSUU

FINLAND

p. (013) 260 6800

Author(s)

Harri Justander

Title

Structural Features and Designing Principles of Steam Turbines

Commissioned by

Harri Justander

Abstract

The purpose of this thesis was to get orientated with the operational and designing principles of steam turbines. Structural design, principles of mechanical designing and material requirements for steam turbines were studied. This thesis was also made to act as a study material for principles of steam turbine technology.

Wide and comprehensive theoretical data about steam turbines was gathered in order to accomplish this thesis. Operation of a steam turbine at power plant environment was also observed. This gathered data was used to create a report which demonstrated the operational principles of steam turbines, turbine process in power plant environment, different turbine components and their key designing principles. Machinery vibrations and failure mechanisms of material applied to steam turbines were also considered.

The extent of the subject in this thesis required the documentation to be limited. This report was only able to demonstrate the key basics of the most important themes related to steam turbine technology. Despite the limits in documentation, this report became a successful introduction to steam turbine technology from a mechanical engineering aspect.

Language

Finnish

Pages 71

Keywords

steam turbine, energy engineering, mechanical engineering

Sisältö

Tiivistelmä

Abstract

Sanasto

1	Johdanto	6
2	Höyryturbiini ja sen toimintaperiaatteet	7
2.1	Höyryturbiini	7
2.1.1	Aktioturbiini	11
2.1.2	Reaktioturbiini	12
2.2	Turbiinin nopeuskolmiot	13
2.3	Vesihöyry ja sen ominaisuudet	16
2.4	Turbiiniprosessi	17
3	Turbiinin perusta	20
4	Turbiinin pesät	22
4.1	Pesän lämpölaajeneminen	24
4.2	Jakotaso	25
5	Roottori	27
5.1	Mekaaniset kuormat	29
5.2	Viruminen ja lämpöväsyminen	29
5.3	Kriittinen pyörimisnopeus	31
5.4	Roottoreiden materiaalitekniikka	32
5.5	Aktioturbiinin roottori	33
5.6	Reaktioturbiinin roottori	34
5.7	Reaktioturbiinin tasapainotusmäntä	35
5.8	Roottorin kytkimet	36
6	Turbiinin laakerointi	37
6.1	Tukilaakeri	39
6.2	Painelaakeri	39
7	Turbiinin säätötavat	41
8	Höyryventtiilit	43
9	Turbiinin voitelujärjestelmä	45
10	Turbiinin juoksusiivet	47
10.1	Aktiovyöhykkeiden siivet	47
10.2	Reaktiovyöhykkeiden siivet	48
10.3	Matalapainevyöhykkeiden pitkät siivet	49
10.4	Siipiin kohdistuvat rasitukset	50
10.5	Mekaaniset rasitukset	52
10.6	Siipien värähtelymekaniikka	52
10.7	Siipimateriaalit	55
11	Höyryn johtolaitteisto	57
12	Turbiinin tiivistys	59
13	Lauhdutin	63
14	Häviöt	65
14.1	Sisäiset häviöt	65
14.2	Ulkoiset häviöt	66
15	Pohdinta	68

Sanasto

Entalpia	Aineen tilaa kuvaava suure, joka määritellään aineen sisäisen energian, eli molekyylien liike-energian ja syrjäytymistyön (paine*tilavuus) summaksi. Yksikkö J/kg ja merkitään kirjaimella i tai h . Kuvaa aineen kykyä tehdä työtä.
Entropia	Laskennallinen termodynaamisen järjestelmän epäjärjestystä kuvaava suure. Järjestelmän tilanmuutoksissa entropia kasvaa ja järjestelmän kyky tehdä työtä pienenee. Yksikkö J/K, merkitään kirjaimella s .
Paisunta	Ilmiö, jossa kaasun paine alenee ja tilavuus kasvaa. Lämpövoimakone muuttaa paisunnan alku- ja lopputilan välisen entalpiaeron työksi.
Kuristus	Kaasun paineen aleneminen ilman, että siitä saadaan mekaanista työtä. Kuristuksessa kaasun lämpötila laskee ja entropia kasvaa. Yksi turbiinin mahdollisista säätötavoista.
Paaksaus	Turbiiniakselin pyörittäminen ulkopuolisella laitteella käynnistys- ja alasajotilanteissa. Tasaa materiaaliin kohdistuvia lämpökuormia.
Stelliitti	Erittäin kova ja sitkeä koboltti-kromi-volframiseos, jonka kobolttipitoisuus on yli 50 %. Kestää erittäin korkeita lämpötiloja, korroosiota ja eroosiota.

1 Johdanto

Höyryturbiini on Irlantilaisen Charles A. Parsonsin vuonna 1884 keksimä lämpövoimakone, jolla vesihöyryn sisältämä terminen energia voidaan muuttaa mekaaniseksi työksi. Vain vuotta myöhemmin ruotsalainen Gustaf de Laval kehitti turbiinin, joka toimi hieman eri toimintaperiaatteella kuin Parsonin keksimä turbiini. Höyryturbiinin keksiminen mullisti merenkäynnin ja sähköntuotannon 1800- ja 1900 lukujen vaihteessa. Vielä tänäkin päivänä höyryturbiini on merkittävin kone sähköenergian tuotannossa ja sen avulla tuotetaan noin 80% kaikesta maailmalla käytettävästä sähköenergiasta.

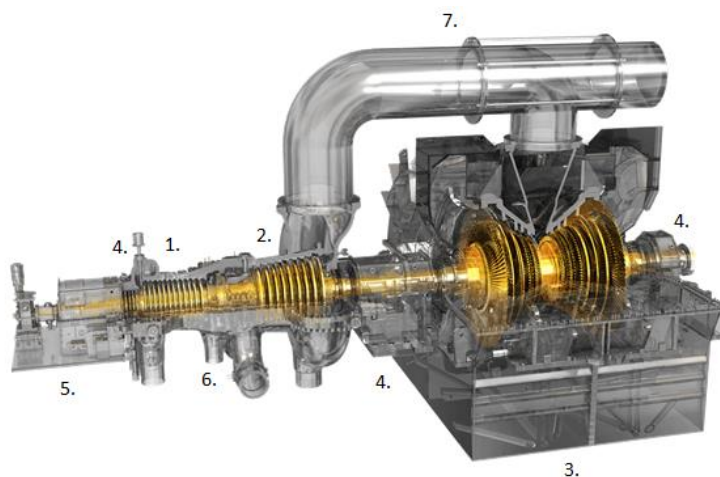
Tämän opinnäytetyön tavoitteena oli syventää tietämystä höyryturbiinien erilaisista rakenteista, turbiinien toimintaperiaatteista ja tärkeimmistä koneteknisistä suunnitteluperusteista. Työ on tehty keräämällä laaja teoreettinen aineisto turbiinitekniikkaan liittyen ja tarkastelemalla höyryturbiinin toimintaa voimalaitosympäristössä. Työssä on keskitytty aksiaaliturbiineihin ja niiden soveltamiseen energiantuotannossa, sillä tämä turbiinityyppi on yleisin käytössä oleva sovellus energiateollisuudessa.

Työssä esitellään höyryturbiinin toimintaperiaatteet itse koneen osalta sekä voimalaitosprosessina. Pääasiallisesti työssä käydään läpi turbiinien erilaiset rakenteelliset ratkaisut ja näihin liittyvät keskeisimmät suunnitteluperusteet sekä materiaalitekniset vaatimukset.

2 Höryturbiini ja sen toimintaperiaatteet

2.1 Höryturbiini

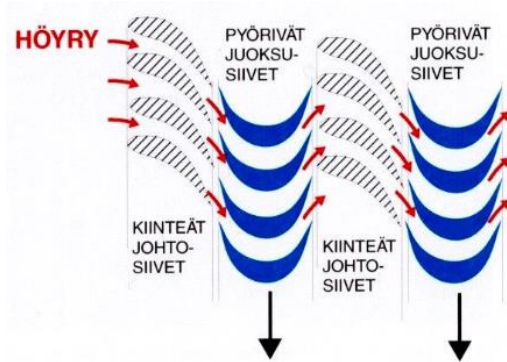
Höryturbiini (kuvio 1) on lämpövoimakone, joka muuttaa vesihöyryn entalpian turbiiniakselin mekaaniseksi energiaksi. Energiamuutos tapahtuu turbiinissa vaiheittain, jossa ensiksi höyryn entalpia muuttuu liike-energiaksi turbiinin johtosivissä, joissa höyryn nopeus kasvaa, jonka jälkeen höyry ohjautuu juoksusivisiin. Juoksusivissä höyryn liike-energia muuttuu edelleen turbiiniakselia pyörittäväksi mekaaniseksi energiaksi (kuvio 2). Energiamuutosprosessi saadaan aikaiseksi antamalla höyryn paisua turbiinin eri vaiheissa tulopainettaan matalampiin paineisiin.



Kuvio 1. Tyypillinen höryturbiinin rakenne (GE Power Generation 2016).’

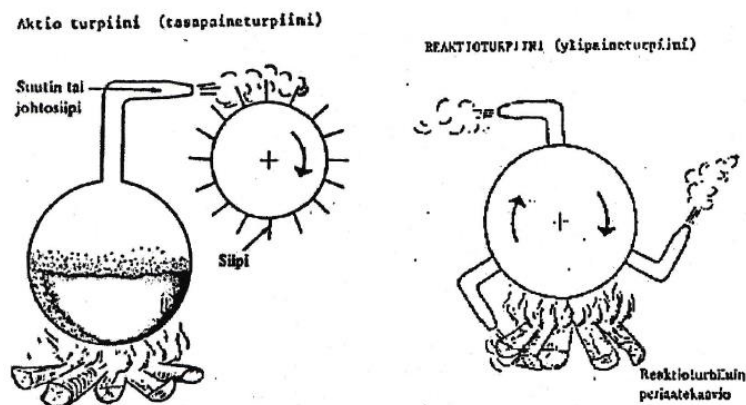
Kuvioon 1 merkityt osat selitettynä:

1. korkeapaineturbiini
2. keskipaineturbiini
3. matalapaineturbiini
4. turbiiniakselin laakerointi
5. turbiinin öljyjärjestelmän pumppu
6. höyryn tulo turbiiniin
7. höyryputki keskipaineturbiinilta matalapaineturbiiniin.



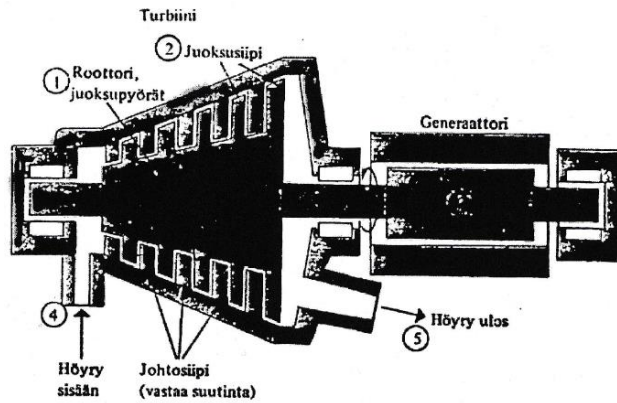
Kuvio 2. Turbiinin toimintaperiaate (Turunen-Saaresti 2008).

Turbiinit jaotellaan yleisesti toimintatavan perusteella kahteen eri tyyppiin (kuvio 3): aktioturbiiniin ja reaktioturbiiniin. Nykyaikaiset turbiinit ovat aktioreaktioturbii-neita, eli niistä löytyy näitä molempia toimintatapoja eri osista konetta. Turbiineja jaotellaan myös käyttötarkoituksen ja rakenteen mukaisesti: lauhdeturbiinia käytetään pelkästään sähköntuotantoon, kun taas vastapaineturbiinilla tuotetaan sähkön lisäksi kaukolämpöä tai teollisuuden tarvitsemaa prosessihöyryä.

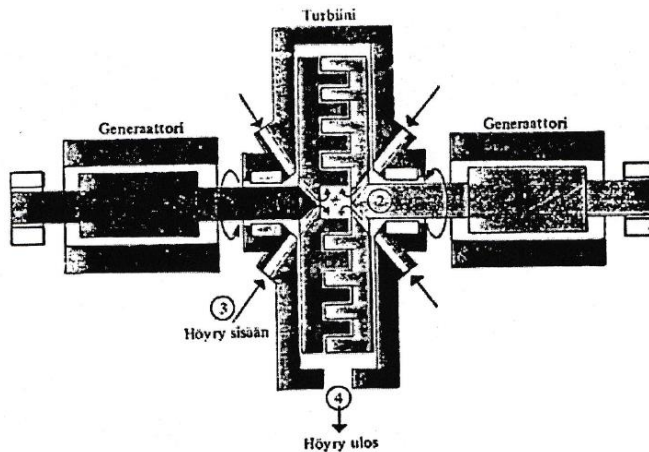


Kuvio 3. Turbiinityypien yksinkertaistetut periaatekaaviot (Toivanen 1999).

Rakenteellisesti turbiinit voidaan jakaa vielä aksiaali- ja radiaaliturbii-neihin. Aksiaaliturbiinissa (kuvio 4) höyry virtaa aksiaalisesti eli turbiiniakselin suuntaisesti, kun taas radiaaliturbiinissa (kuvio 5) höyryn virtaus tapahtuu kohtisuoraan turbii-niakselia nähden. Yleisesti suurimmat teollisuuslaitokset käyttävät energiantuo-tantoon pelkästään aksiaaliturbiinia, koska suurten radiaaliturbii-neiden rakenta-minen aiheuttaa konstruktiovaikeuksia.



Kuvio 4. Aksiaaliturbiinin rakenne (Toivanen 1999).

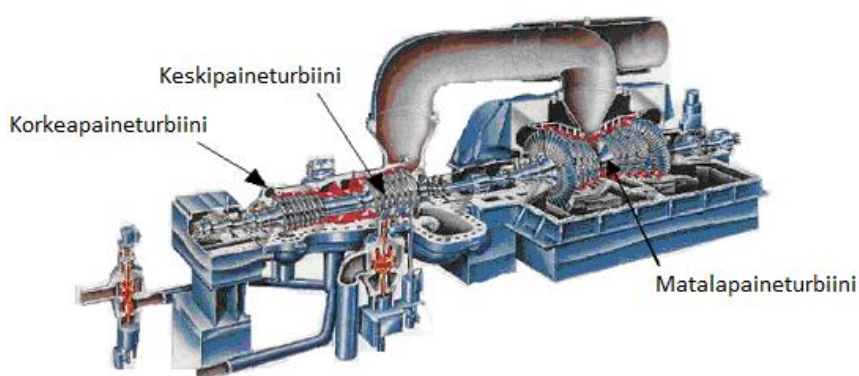


Kuvio 5. Radiaaliturbiinin rakenne (Toivanen 1999).

Turbiinit koostuvat lähes poikkeuksetta useista eri turbiinipesistä, jotka jaotellaan höyryn paineen mukaisesti korkea-, keski- ja matalapaineturbiineiksi (kuvio 6). Kaikki eri paineluokkien mukaan jaotellut turbiinit on yhdistetty samalle turbiiniakselille.

Keski- ja matalapaineturbiinit voivat olla myös yhdistettynä yhteen turbiinipesään. Tällaista osittelua höyryn paineen perusteella tarvitaan, koska höyryn paineen pienentyessä turbiinin sisäisissä prosesseissa höyry laajenee ja sen tilavuusvirta kasvaa. Jos höyryn paisunnan haluttaisiin tapahtuvan yhdessä turbiinissa, tämän tulisi olla kooltaan todella suuri ja turbiinin loppupään siipien pituus kasvaisi niin paljon, että keskipakovoiman takia ne hajoaisivat. (Larjola 2008, 118.)

Höyryn kosteus turbiinin sisällä ei saa nousta liian suureksi, sillä kostean höyryn vesipisarat aiheuttavat eroosiota niiden osuessa turbiinin siivistöihin. Myöskään tämän ilmiön takia höyryn paisunta ei saa tapahtua pelkästään yhdessä turbiinissa vaan tarvitaan eri paineluokkiin jaoteltuja turbiineja. Nykyaikaisissa voimalaitoksissa käytetään turbiiniprosessin yhteydessä välitulistusta, joka tarkoittaa korkeapaineturbiinin jälkeisen höyryn johtamista uudelleen kattilapiirin välitulistukseen. Tällä tavalla pystytään parhaiten hyödyntämään suurin osa höyryn energiasisällöstä. (Larjola 2008, 118.)



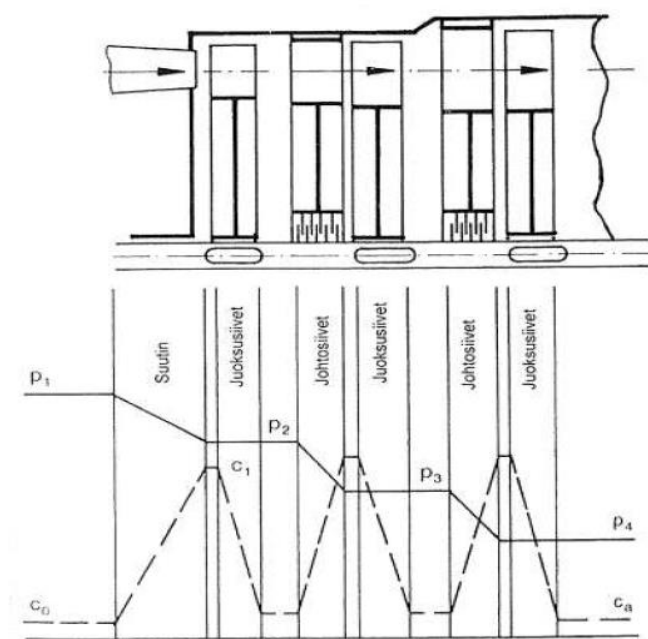
Kuvio 6. Höyryturbiinin jaottelu paineen perusteella (Electropaedia 2005).

Turbiinin voidaan ajatella karkeasti koostuvan kahdesta pääkomponentista: johtolaitteiston sisältävästä turbiinipesästä ja juoksusiivet kantavasta roottorista. Turbiinipesä ja roottori on varustettu useilla peräkkäisillä siivistöillä, joiden tehtävänä on muuntaa virtaavan höyryn entalpia turbiiniroottorin mekaaniseksi energiaksi. Yhden johto- ja juoksusiivistön muodostamaa kokonaisuutta sanotaan turbiinivyöhykkeeksi tai -vaiheeksi.

Turbiinin pesien, sekä johtolaitteistojen ja roottorin juoksusiipien lisäksi muita turbiinin tärkeimpiä komponentteja ovat akseli, kytkimet, laakerointi, höyrytiivistys, erilaiset välitotot, öljynkierto pumppuineen, lauhdutin sekä tuorehöyryn säätöventtiilit.

2.1.1 Aktioturbiini

Aktioturbiinin, josta käytetään myös nimityksiä impulssiturbiini ja tasapaineturbiini, toiminta perustuu höyryn nopeuden muutoksen aiheuttamaan impulssivoimaan turbiinin juoksusiivissä. Impulssivoima aiheutuu korkeanopeuksisen virtaavan aineen, höyryturbiinin tapauksessa vesihöyryn, osumisesta juoksusiipeen suuttimesta tai johtosiivestä tullessaan, jonka jälkeen höyryvirtaus muuttaa suuntaansa ja sen liike-energia pienenee siitä osan siirtyessä juoksusiiven liike-energiaksi (kuvio 7). Höyryn johduttua juoksusiivistä seuraavaan vaiheeseen, sen nopeutta kasvatetaan jälleen seuraavissa johtosiivissä, jolloin sen paine laskee muuttuen höyryvirtauksen liike-energiaksi, joka edelleen johdetaan seuraaviin juoksusiipiin. Energian siirron määrittää höyrystiivien suhteellisen nopeuden muutos pyöriviin juoksusiipiin nähden. (Toivanen 1999, 6.)

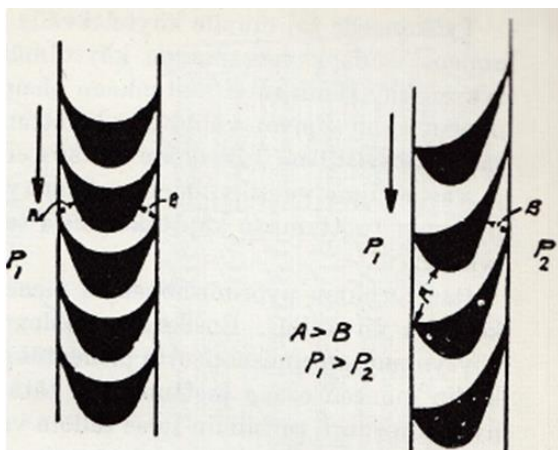


Kuvio 7. Aktioturbiinin toimintaperiaate. Symboli C kuvaa höyryvirtauksen nopeutta, symboli P kuvaa höyryn painetta (Huhtinen 2013).

Nimitys tasapaineturbiini johtuu siitä, että juoksupyörän molemmilla puolilla vallitsee sama paine, koska paine muuttuu ainoastaan turbiinin johtosiivissä (Nygren 1964, 273).

2.1.2 Reaktioturbiini

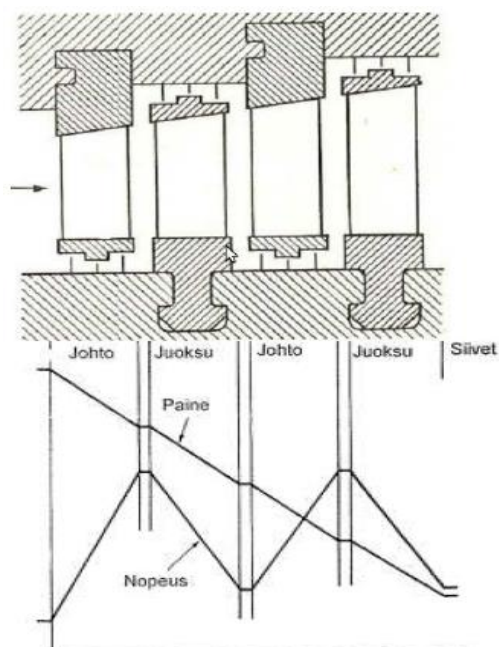
Reaktioturbiinin, josta käytetään myös nimitystä ylipaineturbiini, toiminta perustuu osittain impulssivoimaan, mutta myös juoksusiipien muodon aiheuttamaan reaktiovoimaan. Reaktioturbiinin juoksusiipikanavat kapenevat loppua myöten, jolloin ne toimivat myös höyryvirtausta kiihdyttävän suuttimen tavoin (kuvio 8).



Kuvio 8. Turbiinityypien siipikanavat. Kuvassa vasemmalla aktioturbiini ja oikealla reaktioturbiini. Symbolit A ja B kuvaavat virtauspinta-alaa. P_1 on höyrynpaine ennen juoksusiipiä ja P_2 höyrynpaine juoksusiipien jälkeen (Nygren 1964).

Juoksusiiven kapeneva siipikanavan muoto aiheuttaa höyryn paineen putoamisen ja kun höyry paine-erosta johtuen purkautuu suutinmaisesta juoksusiivestä, joutuu siipi reaktiovoiman työntämänä liikkeeseen, kuten ammuttaessa ase iskee luodin liikesuunnalle vastakkaiseen suuntaan (Nygren 1964, 273).

Reaktioturbiinit toimivat siis puoliksi aktioperiaatteella reaktioperiaatteen lisäksi. Reaktioturbiinissa höyry iskeytyessään juoksusiipeen aiheuttaa impulssivoiman, virtauksen suunta muuttuu ja johtuen reaktioturbiinin juoksusiiven siipikanavan kapenevasta muodosta loppuaan kohden, höyryvirtauksen paine laskee (kuvio 9) ja höyryn paisunta aiheuttaa juoksusiipeen kohdistuvan vastakkaisen reaktiovoiman. (Nygren 1964, 273.)

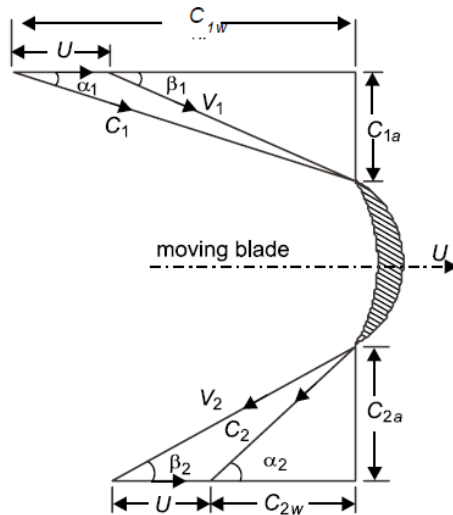


Kuvio 9. Reaktioturbiinin toimintaperiaate (Huhtinen 2013).

Nimitys ylipaineturbiini johtuu siitä, että juoksupyörän kummallakin puolella vallitsee suuruudeltaan erilainen höyrynpaine, koska tässä konstruktiossa höyrynpaineen muutos tapahtuu myös juoksusiivissä johtosiipien lisäksi (Nygren 1964, 273). Tämän takia reaktioturbiineiden roottoreihin kohdistuu paljon suurempia aksiaalivoimia kuin puhtaisiin aktioturbiineihin.

2.2 Turbiinin nopeuskolmiot

Höyryn käyttäytymistä turbiinin siivistöissä mallinnetaan käyttämällä vektorilaskentaan perustuvia nopeuskolmioita (kuvio 10). Nopeuskolmioista selvitettävillä muuttujilla on suuri merkitys turbiinin suunnitteluun ja tämä laskenta onkin perusteena lähes koko turbiinisiivistön mitoittamiseen. Nopeuskolmioiden avulla määritetään esimerkiksi siipikulmia, siiven pituuksia, siivistön tuottamaa tehoa, sen hyötysuhdetta, höyryvirtauksen aiheuttamia voimia siipiin, tarvittavien turbiinijaksojen määrää sekä turbiinin termodynamiikkaa.



Kuvio 10. Impulssiturbiinin nopeuskolmiot (Singh 2006).

Vektorit selitettynä (Singh 2006, 623-626):

C_1	höyryn tulonopeus suuttimen jälkeen
C_2	höyryn poistumisnopeus siiven jälkeen
U	siiven kehänopeus
C_{1w}	absoluuttisen höyryn nopeuden tangentialinen komponentti sisäänvirtauksessa liikkuvaan siipeen nähden
C_{2w}	absoluuttisen höyryn nopeuden tangentialinen komponentti ulosvirtauksessa liikkuvaan siipeen nähden
C_{1a}	absoluuttisen höyryn nopeuden aksiaalinen komponentti sisäänvirtauksessa liikkuvaan siipeen nähden
C_{2a}	absoluuttisen höyryn nopeuden aksiaalinen komponentti ulosvirtauksessa liikkuvaan siipeen nähden
V_1	höyryn suhteellinen nopeus sisäänvirtauksessa liikkuvaan siipeen nähden
V_2	höyryn suhteellinen nopeus ulosvirtauksessa liikkuvaan siipeen nähden
α_1	höyryn tulonopeuden kulma siiven liikesuuntaan nähden
α_2	höyryn poistumisnopeuden kulma siiven liikesuuntaan nähden
β_1	höyryn suhteellisen nopeuden tulokulma siiven liikesuuntaan nähden
β_2	höyryn suhteellisen nopeuden poistumiskulma siiven liikesuuntaan nähden.

Höyry virtaa suuttimesta siipeen nopeudella C_1 , kulmassa α_1 , mutta johtuen siiven liikkeestä höyry virtaa siipeen todellisuudessa suhteellisella nopeudella V_1 ja kulmassa β_1 . Jottei höyry törmäisi siipeen, täytyy suhteellisen nopeuden olla siiven tuloreunan suuntainen. Höyryvirtaus jättää siiven nopeudella V_2 , joka on höyryn suhteellinen nopeus ulos virtauksessa liikkuvaan siipeen nähden. Näin ollen suhteellinen nopeus on todellinen höyryvirtauksen nopeus siivistössä. Aktioperiaatteella toimivan siiven pinnan ollessa täysin virtausta vastustamaton, suhteellinen nopeus on sama siipeen tullessa kuin siitä lähtiessä. Todellisuudessa pinta aiheuttaa aina kitkaa virtaukseen ja nopeudet eivät ole koskaan yhtä suuria. (Singh 2006, 625.)

Siipeen vaikuttava kehävoima (F_T) saadaan nopeusvektoreiden C_{1w} ja C_{2w} erotuksen tai suhteellisen nopeuden tangentialisten komponenttien ja höyryn massavirran tulosta. Siipiin vaikuttava aksiaalivoima (F_A) lasketaan samalla periaatteella käyttäen nopeuskolmioiden vektoreiden C_{1a} ja C_{2a} erotusta. (Singh 2006, 626.)

$$F_T = q_m(C_{1w} - C_{2w})$$

$$F_A = q_m(C_{1a} - C_{2a})$$

q_m höyryn massavirta (kg/s)

Turbiinin akseliteho lasketaan kehävoiman ja kehänopeuden tulona (Singh 2006, 626):

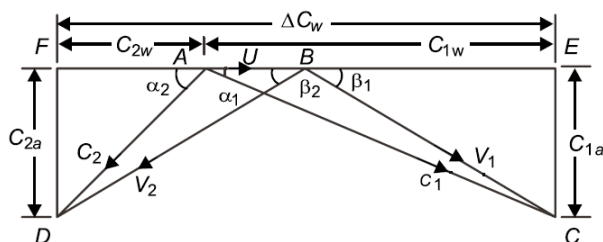
$$P = U * q_m(C_{1w} - C_{2w})$$

$$U = \frac{\pi d N}{60}$$

d siivistön keskihalkaisija (m)

N turbiinin pyörimisnopeus (rpm)

Turbiinin laskennassa on tyypillistä yhdistää nopeuskolmiot kehänopeusvektorin kohdasta (kuvio 11). Reaktioturbiinin nopeuskolmioiden mallinnus tapahtuu samalla periaatteella. Eroa aktioturbiiniin on kolmioiden erilainen muoto johtuen höyryn nopeuden kasvusta reaktioturbiinin juoksusiivistössä.



Kuvio 11. Aktioturbiinin yhdistetyt nopeuskolmiot (Singh 2006).

2.3 Vesihöyry ja sen ominaisuudet

Vesihöyryä syntyy, kun veteen viedään tarvittava energia sen höyrystämiseen. Lähtökohtaisesti veden kiehumispiste normaalissa 1 bar paineessa on 100°C. Veden kiehumispiste kasvaa paineen noustessa.

Vesihöyryä voidaan luoda normaalia ilmanpainetta korkeammassa paineessa, joka johtaa korkeampiin höyryn lämpötiloihin. Mitä korkeampi paine on, sitä korkeampi lämpötila höyrylle saadaan. Korkeamman lämpötilan omaavaan höyryyn varastoituu enemmän lämpöenergiaa, jolloin sen entalpia kasvaa.

Veden höyrystyessä höyry sisältää aluksi vesipisaroita, jolloin puhutaan kosteasta höyrystä. Jos höyryä lämmitetään edelleen, jolloin loputkin vesipisarat muuttuvat höyryksi, tai pisarat poistetaan höyrystä jollain muulla tavalla, kutsutaan höyryä kuivaksi kylläiseksi höyryksi. Jos kuivaa kylläistä höyryä lämmitetään edelleen vakioaineessa, höyryn lämpötila nousee edelleen ja puhutaan tulistetusta höyrystä. Tulistettu höyry on täysin kaasumaista ainetta. (Larjola 2008, 107.) Turbiinin suunnittelussa haasteita aiheuttaa höyryn kosteuspitoisuuden nouseminen turbiinin viimeisissä vyöhykkeissä.

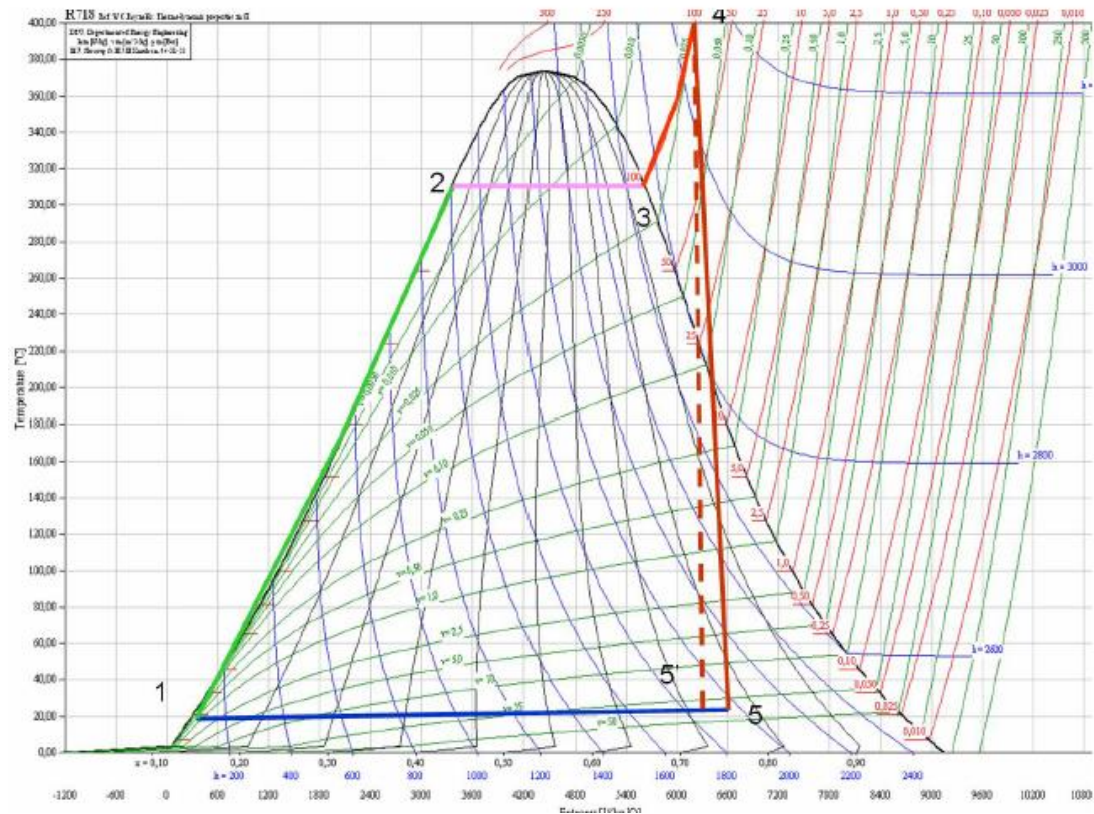
Höyryn ominaisuuksien arviointiin adiabaattisissa vakiovirtausprosesseissa, kuten turbiiniprosessissa, käytetään vesihöyryn entalpia-entropia (H-S), sekä lämpötila-entropia (T-S) kaavioita.

H-S- ja T-S- kaavioista on mahdollista selvittää esimerkiksi höyryn kosteuspitoisuus, höyryn paine, lämpötila sekä entalpia voimalaitosprosessien eri vaiheissa.

2.4 Turbiiniprosessi

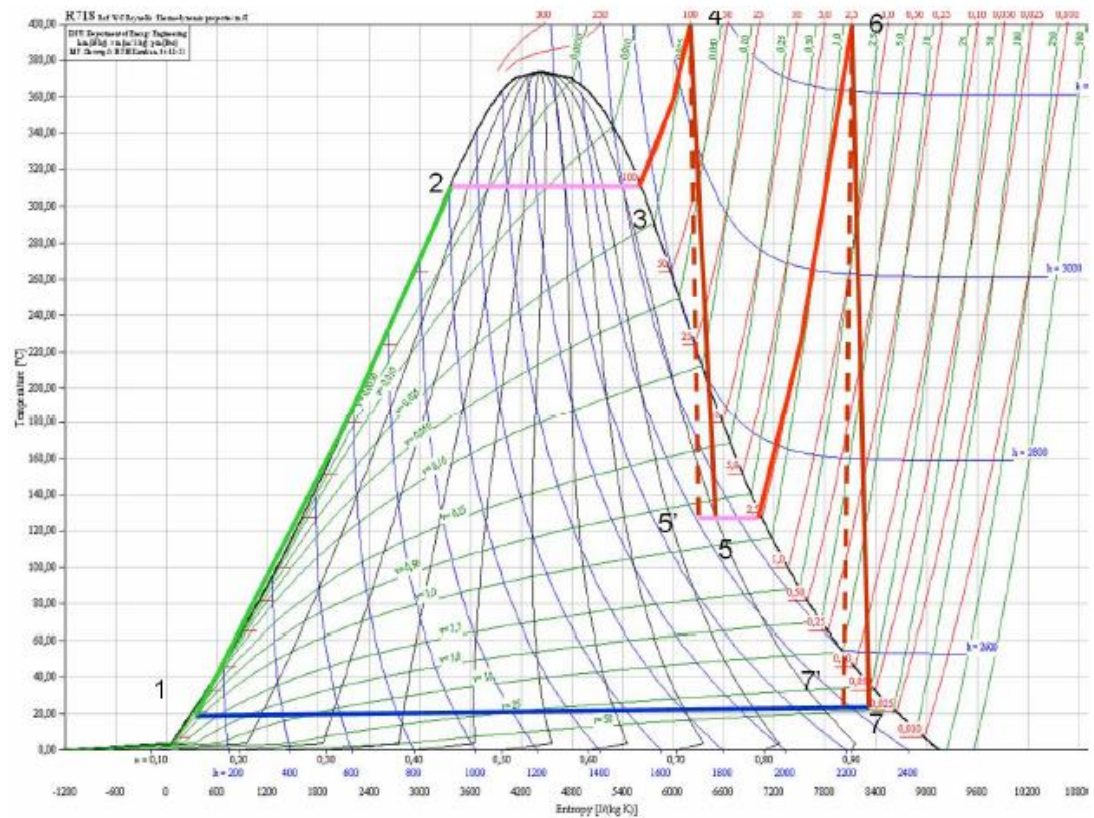
Turbiiniprosessissa eli Rankine-prosessissa höyryvoimalaitoksessa käytettävän polttoaineen kemiallinen energia muutetaan kattilassa lämpöenergiaksi, joka siirretään kattilan vesi-höyrypiirissä virtaavaan fluidiin. Vesi- höyrypiirissä vaadittuun lämpötilaan tulistettu höyry ohjataan tämän jälkeen turbiinille, jossa sen entalpia muutetaan mekaaniseksi energiaksi, joka pyörittää turbiinia ja turbiiniin liitettyä generaattoria tuottaen sähköä. Turbiinille ohjattavaa höyryä kutsutaan tuorehöyryksi ja tämän höyryn tyypilliset lämpötilat vaihtelevat 500 - 600 °C välillä paineluokan ollessa 150 - 300 bar. (Larjola 2008, 98.)

Prosessi alkaa nostamalla voimalaitoksen vesi-höyrypiirissä käytettävän veden paine kattilan painetta vastaavaan voimalaitoksen syöttövesipumpuilla. Seuraavaksi vesi lämmitetään kiehumispisteeseensä, jonka jälkeen se keitetään kiuvaaksi kylläiseksi höyryksi. Tämän jälkeen höyry tulistetaan turbiinille tarkoitettuun lämpötilaansa ja johdetaan turbiiniin, jossa sen entalpia muutetaan mekaaniseksi energiaksi. Turbiinin läpi paisuttuaan höyry lauhtuu lauhduttimessa takaisin vedeksi, jonka jälkeen prosessikierto alkaa alusta. Turbiiniprosessi voidaan esittää selkeästi T-S- kaaviossa (kuvio 12).



Kuvio 12. Yksinkertainen turbiiniprosessi T-S-kaaviossa esitettynä: vaiheet 1-2 veden lämmittäminen kiehumispisteeseensä, 2-3 veden keittäminen kylläiseksi höyryksi, 3-4 höyryn tulistus, 4-5 höyryn paisunta turbiinissa. Katkoviiva kuvaa häviötöntä paisuntaa, yhtenäinen viiva on todellinen paisunta. (Larjola 2008.)

Rankine-prosessin hyötysuhdetta on mahdollista parantaa merkittävästi lisäämällä siihen välitulistus (kuvio 13). Välitulistus tarkoittaa höyryn ohjaamista korkeapaineturbiinin jälkeen uudelleen kattilaan lämmitettäväksi, jonka jälkeen höyry ohjataan keski- tai matalapaineturbiiniin riippuen konstruktiosta. Matalapaineturbiinin jälkeen höyry lauhdutetaan ja pumpataan uudelleen prosessikiertoon.



Kuvio 13. Välitulistuksella varustettu turbiiniprosessi. 1-2 veden lämmitys kiehumispisteeseen, 2-3 veden keittäminen kylläiseksi höyryksi, 3-4 höyryn tulistus, 4-5 höyryn paisunta korkeapaineturbiinissa, 5-6 välitulistus, 6-7 höyryn paisunta keski- ja matalapaineturbiineissa. Katkoviiva kuvaa häviötöntä paisuntaa, yhtenäinen viiva on todellinen paisunta. (Larjola 2008.)

Turbiinista saatavan tehon määrittävät höyryn entalpien muutos turbiinin läpivirtauksessa ja turbiiniin johdettavan höyryn massavirta (Larjola 2008, 101):

$$P_t = q_m(h_1 - h_2)$$

q_m höyryn massavirta (kg/s)

h_1 höyryn ominaisentalpia ennen turbiinia (J/kg)

h_2 höyryn ominaisentalpia turbiinin jälkeen (J/kg)

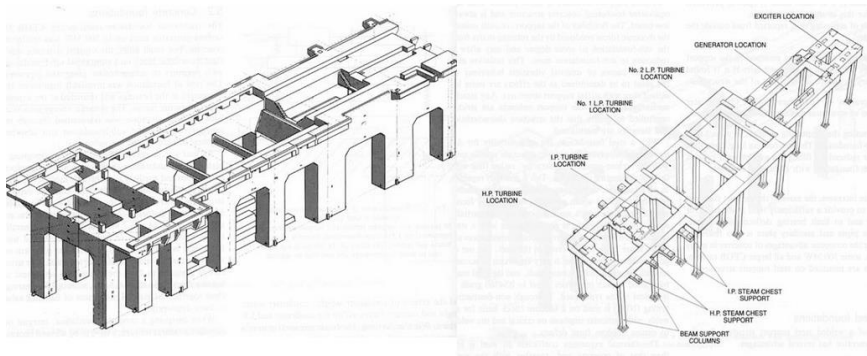
3 Turbiinin perusta

Turbiinin perusta välittää koneesta, generaattorista ja oheislaitteistosta aiheutuvan staattisen ja dynaamisen kuorman maaperään. Sen täytyy myös pystyä pitämään turbiinilaitos paikallaan erilaisissa toimintatilanteissa ja lämpötiloissa sekä absorboida dynaamisten kuormien aiheuttamaa värähtelyä. (Littler 2013, 175.)

Perusta täytyy suunnitella ominaisuuksiltaan sellaiseksi, että siinä on tarpeeksi jäykkyyttä pitääkseen turbiinilaitoksen paikallaan sekä siitä löytyy myös joustavuutta, jolloin vältetään laakerointiin kohdistuvia ylimääräisiä voimia. Värähtelymekaanisesti perusta suunnitellaan niin, että sen ominaistaajuus ei ole lähellä koneen pyörimisnopeutta. (Littler 2013, 175.)

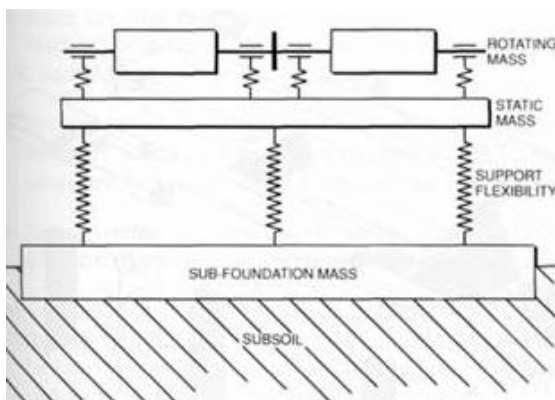
Resonointia ja tärinää silmällä pitäen on mahdollista rakentaa perusta niin sanotusti jäykäksi tai joustavaksi. Jäykässä rakenteessa perustan ominaistaajuus on merkittävästi koneen pyörimisnopeutta ylempänä. Joustavassa rakenteessa perustan ominaistaajuus on pienempi kuin koneen pyörimisnopeus. Jäykässä perustarakenteessa ominaistaajuudet ovat noin 60 Hz luokkaa pystysuunnassa. Joustavassa perustarakenteessa ominaistaajuudet ovat luokkaa 12-18 Hz pystysuunnassa ja 1.5-3 Hz vaakasuunnassa. (Littler 2013, 175-180.)

Turbiinin tukirakenteet tehdään teräsbetonista tai teräksestä (kuvio 14). Betoniset tukirakenteet ovat usein jäykkiä värähtelymekaanisesti, kun taas teräksiset rakenteet ovat joustavia. Teräksisen tukirakenteen edut betoniseen nähden ovat parempi analysoitavuus suunnittelua silmällä pitäen, nopeampi pystytys sekä parempi oheislaitteiden huollettavuus ohuemmasta rakenteesta johtuen. Molempia tukirakennetyyppejä on mahdollista vielä säätää pystytyksen jälkeen värähtelyjä varten. (Littler 2013, 175-180.)



Kuvio 14. Turbiinin betoninen ja teräksinen alustarakenne (Littler 2013).

Suunnitteluvaiheessa turbiinilaitoksen perustaa analysoidaan matemaattisesti erilaisilla massoilla, palkkirakenteilla ja jousilla (kuvio 15). Suunnittelussa otetaan myös huomioon perustan reagointi turbiiniakselin paikoituksen poikkeamiin, epätasapainon aiheuttamat kuormitukset, kuorman muutokset ja generaattorin mahdollisten vikatilojen aiheuttamat vääntöpoikkeamat. Matemaattiset mallit perustoista kaikkine muuttujineen ovat hyvin monimutkaisia, joten tämä suunnittelu tehdään tietokoneavusteisesti. (Littler 2013, 175-180.)



Kuvio 15. Turbiinilaitoksen perustan värähtelymekaaninen malli (Littler 2013).

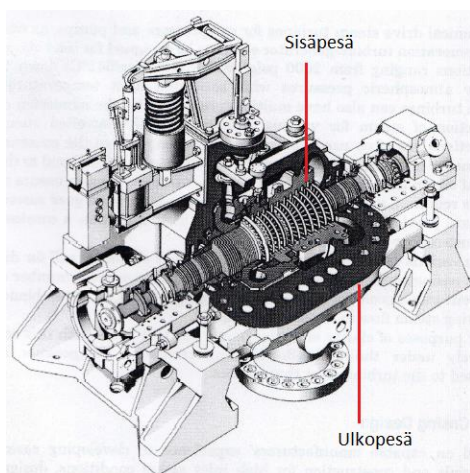
Tukirakenteiden ja maaperän välinen perusta on massiivinen ja jäykkä betoni-laatta, joka ottaa vastaan turbiinilaitoksen staattiset ja dynaamiset kuormat sekä siirtää nämä maaperään. Turbiinin perusta eristetään muista voimalaitosrakenteista. Tällä estetään värähtelyjen siirtyminen lähellä oleviin rakenteisiin. (Littler 2013, 175-180.)

4 Turbiinin pesät

Aksiaaliturbiineissa pesät ovat jaettuina kahteen osaan ja pesäpuoliskot erottaa paksu laippa. Pesäpuoliskoissa ei ole erillistä tiivistystä, vaan puoliskot ovat liitettyinä toistensa metallipintoja vasten (Bloch & Singh 2009, 31). Turbiinipesät ovat tavallisesti valmistettu valamalla seosteräksestä, hiiliteräksestä tai valuraudasta riippuen höyryn paineesta ja lämpötilasta. Pesien ylä- ja alapuoliskot valmistetaan mahdollisimman symmetrisiksi. Turbiinipesien puoliskot liitetään toisiinsa paksuilla laipoilla ja jykevillä pulteilla. Laippaliitoksien ainepaksuuksien takia laippaan on jyrskitty urat, joihin johdetaan turbiinin käynnistyksen aikana tulistettua höyryä. Tätä kutsutaan turbiinin laippa- ja pultilämmitykseksi, jonka tarkoituksena on tasoittaa lämpötilaeroja ja pienentää materiaalin lämpörasituksia käynnistyksen yhteydessä. (Toivanen 1999, 16- 17.)

Turbiinipesiin rakennetaan höyryn väliottoja vyöhykkeiden välille, joista johdetaan tietyn lämpöistä höyryä voimalaitoksen kiertoprosessin esilämmityksiin, kaukolämmönvaihtimiin tai prosessihöyryksi riippuen koneen konstruktiosta ja käyttötarkoituksesta.

Korkeilla höyrynpaineilla turbiinipesissä käytetään usein kaksoisseinämäraakennetta (kuvio 16). Tämä konstruktio mahdollistaa pesien seinämien välisten paineerojen jakautumisen puoliksi ja siten seinämien ainepaksuudet voidaan pitää siedettävänä. (Toivanen 1999, 20.)



Kuvio 16. Höyryturbiinin pesän kaksoisseinämäraakenne (Bloch & Singh, 2013).

Turbiinipesä on paineastia, jonka tulee kestää höyryn paineen aiheuttamat jännitykset, sekä pitää tietty jäykkyys aksiaalisuunnassa pitääkseen koneen pyörivät ja paikallaan olevat osat sopivalla etäisyydellä toisistaan. Pesän suunnittelussa haasteita aiheuttavat suuret lämpötilamuutokset käynnistystilanteissa sekä laippaliitokseen kohdistuvat paineen aiheuttamat jännitykset. Paksut laipparakenteet lämpenevät hitaammin kuin pesän kuori, johtaen epätasaisten lämpölaajenemisten kautta lämpöjännityksiin materiaalissa. Vaikeasti hallittavia jännityksiä esiintyy myös akselin ja pesän välisissä tiivistysrakenteissa sekä höyryn tulo- ja poistusrakenteissa. (Littler 2013, 73.)

Turbiinipesien seinämänpaksuuksia mallinnetaan seuraavaa kaavaa käyttäen (Shlyakhin 2005, 187):

$$\delta = \frac{Dp}{2t}$$

δ	pesän seinään kohdistuva jännitys (MPa)
D	pesän sisähalkaisija (mm)
p	pesän sisällä vallitseva paine (MPa)
t	seinämän paksuus (mm)

Valuteknisistä ja muista syistä johtuen seinämänpaksuudet tulevat yleensä vahvemmiksi, mitä laskenta edellyttää (Shlyakhin 2005, 187).

Varsinkin korkea- ja keskipaineturbiineissa käytetään kaksoispesärakennetta, jossa turbiinilla on erillinen sisä- ja ulkopesä. Tässä rakenteessa viimeisen jakson läpi tullut höyry johdetaan pesien väliseen tilaan. Tällä saavutetaan pienemmät paine- ja lämpötilaerot pesien välillä, joka johtaa pesän helpompaan valmistettavuuteen. (Littler 2013, 74.)

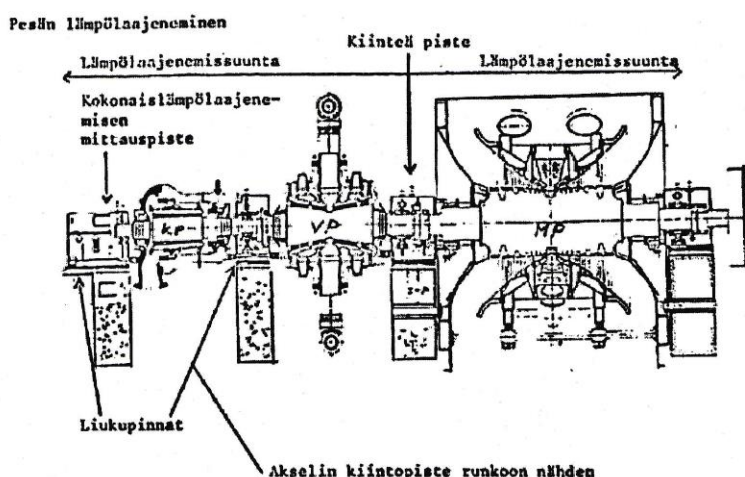
Matalapaineturbiineissa kaksoispesärakennetta käytetään lähinnä johtorakenteiden helpompaa kiinnitystä varten, sillä paineet ja lämpötilat matalapainepuolella eivät ole niin korkeita kuin edeltävissä turbiineissa. Matalapainepesät suunnitellaan niin, että poistohöyry saa mahdollisimman suuren virtauksen poikkipinta-

alan ja mahdollisimman pienen virtaushäviön virratessaan lauhduttimeen. (Littler 2013, 76.)

Pesissä käytettävältä materiaalilta vaaditaan virumisen kestoa, varsinkin korkeapaine- ja keskipainepesissä, joissa höyryn lämpötila on yli 350°C. Korkeilla höyryn paineilla ja lämpötiloilla toimivat pesät valmistetaan valamalla rakenteelta vaadittavan tasalaatuisuuden takia. Näissä pesissä käytetään seosteräksiä, joissa pääasiallisesti seostettuna on kromia, nikkeliä, molybdeeniä, vanadiumia ja volframia. (Shlyakhin 2005, 186.) Matalapaineturbiinien pesät tehdään yleensä hiiliteräksestä, mutta joissain tapauksissa sisäpesä on tehty valamalla pallografiittivaluraudasta (Littler 2013, 76).

4.1 Pesän lämpölaajeneminen

Johtuen suurista lämpötilaeroista turbiinin ollessa kylmänä verrattuna käytön aikaiseen lämpötilaan on välttämätöntä varata turbiinipesälle mahdollisuus lämpömuutosten aiheuttamaan lämpölaajenemiseen ja – kutistumiseen. Turbiinin runko rakennetaan niin, että sillä on vain yksi kiintopiste alustan kanssa (kuvio 17). Tämä kiintopiste sijaitsee yleisesti turbiinin matalapainepäässä, lauhduttimen yhteydessä. Mikäli turbiini koostuu useammasta pesästä, näiden pesien liikkuminen lämpölaajenemisen takia toteutetaan liukupinnoilla, jotka mahdollistavat vapaan liikkeen aksiaalisuunnassa. (Toivanen 1999, 22.)

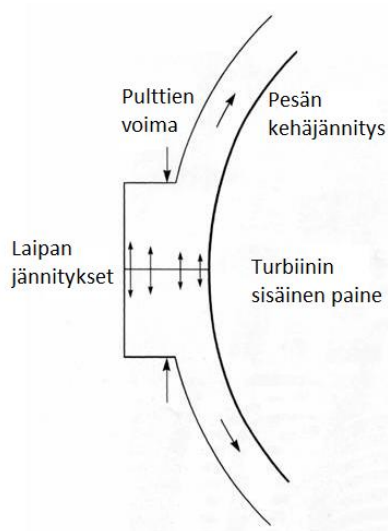


Kuvio 17. Esimerkki turbiinin rungon lämpölaajenemisen mahdollistamisesta (Toivanen 1999).

Pesään kohdistuu lämpörasituksia, jotka ovat suuresti vaikuttamassa sekä turbiinin yleiseen käyttövarmuuteen, että sen kuormanmuutosnopeuteen. Pyörivät osat eivät saa missään olosuhteissa ottaa kiinni pesään kiinnitettyihin kiinteisiin osiin, ja lisäksi materiaalin on muodonmuutoksitta kestävä pesään syntyvät lämpötilaeroista aiheutuvat lämpöjännitykset. (Toivanen 1999, 20.)

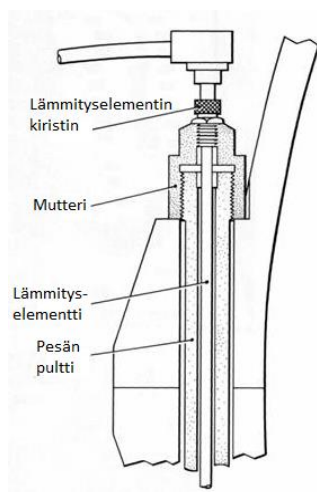
4.2 Jakotaso

Turbiinipesän laippaliitoksen tulee muodostaa tiivis liitos pesäpuoliskojen välille. Liitoksen puoliskojen välisen kontaktipaineen tulee ylittää pesän sisällä vaikuttava höyrynpaine, että liitoksesta tulee tiivis (kuvio 18). Laippaan vaikuttaa myös pesän seinämien välisen paine-eron aiheuttama taivutus, sekä lämpölaajenemisesta johtuva pesän kehäjännitys. Laippaan kohdistuva jännitys on suurin sen ulkolaidalla. (Shlyakhin 2005, 187.)



Kuvio 18. Turbiinipesän laippaliitokseen vaikuttavat voimat (Littler 2013).

Laippaliitoksen pultit (kuvio 19) sijoitetaan vuorotellen turbiinipesien ylä- ja alapuoliskojen jakotaso pitkin. Tällä tavoin saadaan pultit mahdollisimman lähelle ja jaettua liitokseen kohdistuvaa jännitystä tarpeeksi pulteille. Pultit ovat rakenteeltaan onttoja, koska niissä on oltava tilaa lämmityselementille kiristystä varten. Pulttien kiristys tapahtuu lämmittämällä pultit tiettyyn lämpötilaan, ruuvamalla ne käsikireyteen, tämän jälkeen ne käännetään vielä tiettyyn astelukemaan ja annetaan jäähtyä. Tällä tavoin varmistetaan siitä, että kiristystiukkuus on riittävä. (Littler 2013, 78.)



Kuvio 19. Turbiinipesän laippaliitoksen kiinnityspultti (Littler 2013).

Pulttien materiaali riippuu niille asetetuista jännitysvaatimuksista sekä käyttölämpötilasta. Maksimissaan 320°C:ssa toimiville pulteille materiaaliksi riittää hiiliteräs. Sitä korkeammassa lämpötilassa virumisen estämiseksi joudutaan käyttämään seosteräksiä, joissa seosaineina toimivat pääasiassa kromi ja molybdeeni. (Shlyakhin 2005, 189.)

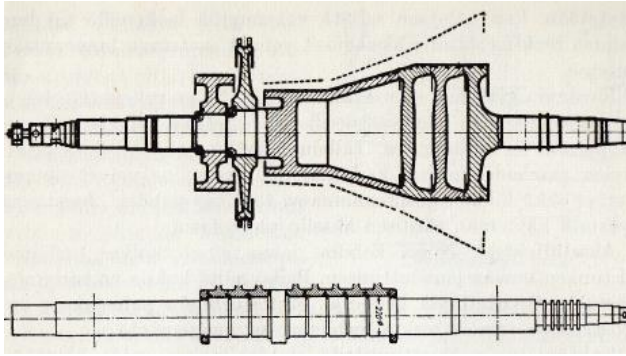
5 Roottori

Turbiinin roottori koostuu turbiiniakselista ja juoksupyörien- tai siipien muodostamasta kokonaisuudesta. Roottorin tehtävä on kantaa turbiinin juoksusiivistö, jossa höyryn entalpia muutetaan mekaaniseksi energiaksi, joka taas akselin välityksellä pyörittää generaattoria tai muuta käyttölaitetta.

Turbiinin akselia kuormittavat vääntö ja taivutus, juoksupyöriin ja -siipiin kohdistuva suurin rasitus on keskipakovoiman aiheuttama. Akselin mitoitusperusteena väännön suhteen käytetään generaattorin oikosulkuolosuhteita. Akselin suunnitteluun liittyy myös voimakkaasti akselin taipuminen ja taivutusvärähtely. (Toivanen 1999, 24.)

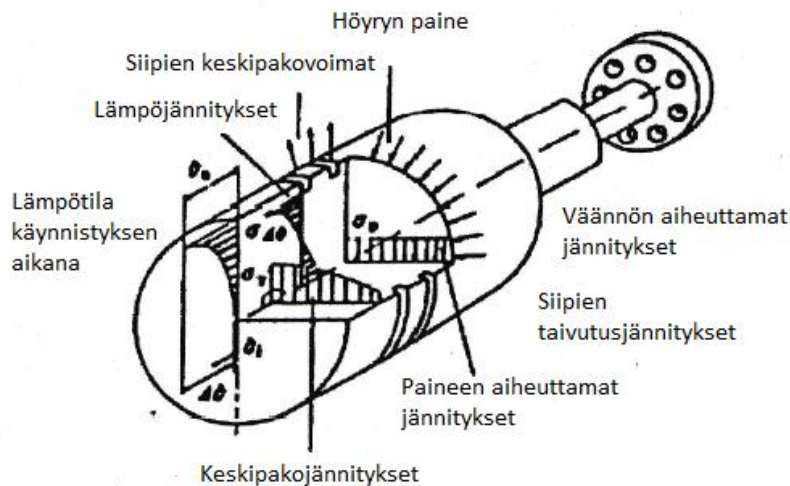
Vaikka kaikki roottorit tasapainotetaan dynaamisesti siipien asentamisen jälkeen, syntyy tietyllä pyörimisnopeudella voimakasta akselin värähtelyä, joka pahimmassa tapauksessa saattaa jopa katkaista akselin. Tämä ns. kriittinen pyörimisnopeus - joita roottorisysteemissä on useita – riippuu akselin pituudesta, paksuudesta ja massojen sijainnista, sekä laakeroinnista. (Toivanen 1999, 24.)

Roottoreissa on merkittäviä rakenteellisia eroja, kun vertaillaan aktio- ja reaktioturbiineita (kuvio 20). Aktioturbiineiden akselit ovat yleisesti ohuita kiinteitä akseleita, kun taas reaktioturbiineiden akselit tehdään rumpumaisiksi ontoiksi rakenteiksi, jotka usein kootaan useasta kappaleesta hitsaamalla. Aktioturbiineiden juoksusiivistöä kutsutaan juoksupyöräksi, jotka ovat kiekkomaisia rakenteita, joihin turbiinisiivet kiinnitetään. Reaktioturbiineiden siivet kiinnitetään suoraan rumpumaisiin roottoreihin koneistettuihin kiinnitysurisiin.



Kuvio 20. Erityyppiset roottorirakenteet: ylempänä kuvassa reaktioturbiinin rum-puroottori, alempana aktioturbiinin roottori ilman juoksupyöriä (Nygren 1964).

Turbiinin roottorin suunnittelussa huomioon otettavia tekijöitä ovat lämpöjännitykset, mekaaniset jännitykset sekä taivutusvärähtely (kuvio 21). Mekaanisia jännityksiä roottoriin aiheutuu siipien kiinnityskohtiin vaikuttavasta keskipakovoimasta, siipien taipumisesta höyryvirtauksessa sekä roottoriin kohdistuvasta höyryn paineesta. Roottoriin kohdistuvan väännön mitoitusperusteena toimivat generaattorin oikosulkuolosuhteet. Lämpöjännityksiä syntyy käynnistys- ja alasajotilanteissa, sekä kuormanmuutoksissa. Erittäin tärkeä näkökohta roottorin suunnittelulle on kriittinen pyörimisnopeus. (Toivanen 1999, 24.)



Kuvio 21. Roottoriin vaikuttavat kuormitukset (Toivanen 1999).

5.1 Mekaaniset kuormat

Roottoriin vaikuttavia mekaanisia kuormia syntyy:

- roottorin oman massan lisäksi juoksupyörien ja siivistöjen painon aiheuttamasta taivutuksesta
- painelaakeroinnin aiheuttamasta pintapaineesta akselin tukipinnalle
- juoksupyörien ja siivistöjen väännöstä
- höyryvirtauksen ja keskipakovoiman vaikutuksesta siipien kiinnityskohtiin. (Shlyakhin 2005, 230.)

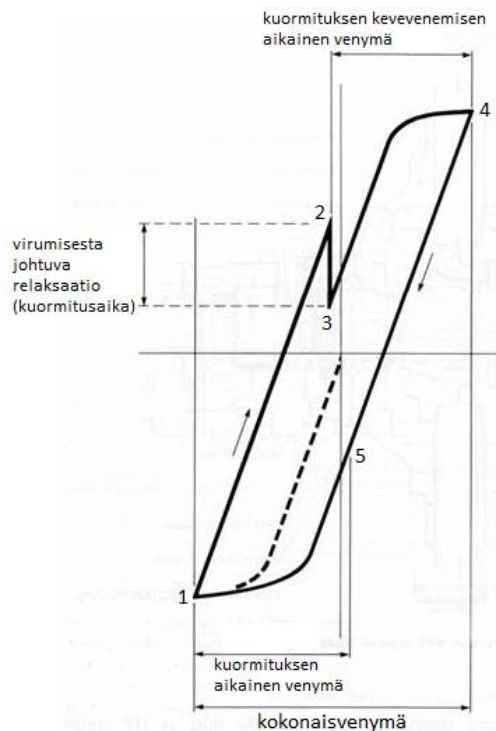
Roottoria suunnitellessa otetaan huomioon suurimmalle rasitukselle altistuvat kohdat. Näiden lisäksi roottorin täytyy kestää vikatilanteen aiheuttamat generaattorin oikosulkuolosuhteet. Generaattorin oikosulussa turbiini-generaattoriakseliin täydellä kuormalla vaikuttava vääntömomentti kasvaa yli kymmenkertaiseksi. Materiaalin ja akseleiden liitosten täytyy kestää tästä aiheutuva äkillinen jännityksen nousu. (Shlyakhin 2005, 230-231.)

5.2 Viruminen ja lämpöväsyminen

Korkeissa lämpötiloissa toimivat osat altistuvat virumiselle ja lämpöväsymiselle. Korkeiden lämpötilojen aiheuttamat rasitukset materiaalille huomioidaan suunnitteluvaiheessa niin, että ne eivät aiheuta liian suuria mekaanisia jännityksiä turbiinin kuormitusten vaihdellessa koneen elinkaaren aikana. (Littler 2013, 92.)

Virumisen tarkastelu voidaan rajoittaa yksityiskohtaiselle rakennegeometrialle, kuten siipien kiinnityskohtiin ja suunnitella nämä alueet tarkemmin. Materiaaliin kohdistuvat jännitykset saadaan pysymään matalana käyttäen virumista kestäviä teräksiä. Lämpöväsyminen liittyy kuormituksen muutosten aiheuttamiin lämpötilaeroihin turbiinin rakenteissa, joka aiheuttaa erilaisia syklisiä jännitystiloja materiaaliin. Korkea- ja välipaineturbiineiden höyryn tulopuolet ovat roottoreiden ohella kriittisiä kohtia lämpöväsymisen syntymiselle ja vaativat erityistä huomiota suunnittelun kannalta. (Littler 2013, 92-93.)

Kuviossa 22 havainnollistetaan lämpösykliä aiheuttamaa jännitystä ja viruman syntymää materiaalissa:



Kuvio 22. Lämpösyklistä aiheutuva materiaaliin vaikuttavan jännitys-venymäkeskittymän malli (Littler 2013).

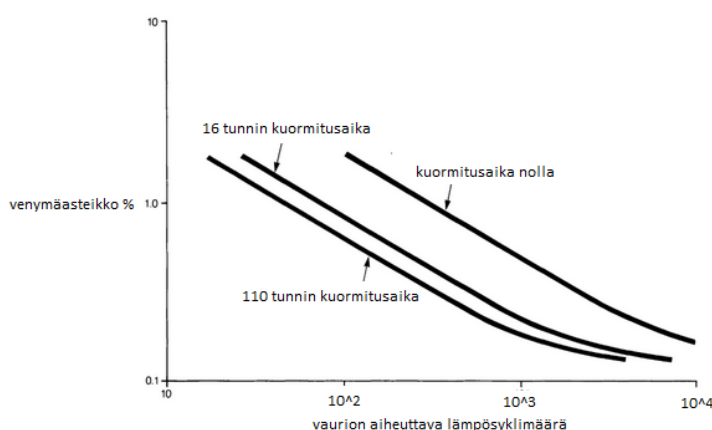
Kuvion 22 pisteessä 1 roottorin pintaan syntyy materiaalin puristumisesta aiheutuva jännitystilä, kun se lämpenee käyttölämpötilaansa (katkoviivaa pitkin), tässä kohdassa lämpöjännitys on suurimmillaan. Lämpöjännitys syntyy roottorin materiaalin paikallisista lämpötilaeroista, joissa ulkopinta lämpenee nopeammin kuin sisäosa, jolloin materiaalin lämpölaajenemiset ovat erilaisia paikoittain. (Littler 2013, 92-94.)

Tästä eteenpäin jännitys alkaa laskea, kun roottorin sisäpuolen lämpötila kohoaa vähitellen samaan kuin pinnan lämpötila, joka johtaa jännitys-venymäkeskittymän liikkumiseen viivaa 1-2 pitkin. Kohdassa 2 nimellinen lämpöjännitys on lähes olematon ja tässä kohdassa vaikuttava jännitys on jäännösjännitystä kohdassa 1 tapahtuneesta materiaalin plastisesta muodonmuutoksesta. (Littler 2013, 92-94.)

Täydellä kuormituksella käytöstä johtuen syntyy materiaaliin virumaa, jonka aiheuttaa pisteeseen 2 jäänyt jäännösjännitys ja korkea lämpötila. Virumisen myötä materiaalin pintaan jäänyt jäännösjännitys laskee pisteeseen 3 relaksaation myötä. (Littler 2013, 92-94.)

Kuorman pudotus saa aikaan roottorin pinnan jäähtymisen, joka johtaa edelleen lämpöjännityksiin materiaalin pintakerroksissa johtuen roottorin pinta- ja sisäpuolen lämpötilaerosta. Jännitys-venymäkeskittymä liikkuu nyt viivaa 3-4 pitkin. Seuraavaksi materiaalin lämpötila alkaa tasaantua pinnan ja sisäosan välillä. Jännitys-venymäkeskittymä liikkuu nyt pisteeseen 5. Tässä kohdassa roottorin lämpö on yleensä liian matala, jolloin virumaa ei synny ja materiaaliin jää jäännösjännityksiä. (Littler 2013, 92-94.)

Kun materiaali altistuu tarpeeksi korkealle lämpötilalle tietyssä jännitys-venymäkeskittymässä liian pitkään, tässä tapauksessa kuvion 24 pisteessä 2, siihen syntyy virumisen aiheuttama plastinen muodonmuutos. Nämä toistuvat materiaalin muodonmuutokset virumisesta johtuen aiheuttavat ajan myötä rakenteen vakavan vaurioitumisen (kuvio 23). Tätä materiaalin vaurioitumismekanismia kutsutaan lämpöväsymiseksi ja se on erittäin merkittävä tekijä turbiineiden suunnittelussa ja kunnonarvioinnissa. (Littler 2013, 92-94.)



Kuvio 23. Lämpösykliä, materiaalin venymän ja kuormitusajan merkitys lämpöväsymisestä aiheutuvien materiaalivaurioiden syntymiseen (Littler 2013).

5.3 Kriittinen pyörimisnopeus

Turbiiniroottorin huolellisesta rakentamisesta ja tasapainottamisesta huolimatta, roottorin massakeskipistettä ei saada täysin kohdistumaan roottorin geometristä keskiakselia vastaavaksi. Tätä massakeskipisteen ja geometrisen keskiakselin etäisyyttä kutsutaan roottorin epäkeskeisyydeksi. Roottorin pyöriessä pienikin epäkeskeisyys aiheuttaa poikittaisen voiman roottoriin nähden, joka kasvaa pyörimisnopeuden myötä ja pyrkii taivuttamaan roottoria. (Shlyakhin 2005, 232.)

Pyörimisnopeutta, joka vastaa laskennallista roottorin ominaistajuutta, kutsutaan kriittiseksi pyörimisnopeudeksi. Teoreettisesti tällä pyörimisnopeudessa roottorin taipuma pyrkii kasvamaan loputtomasti. Tämän takia turbiiniroottorit suunnitellaan toimimaan niin, etteivät ne pyöri tällä nopeudella käyttöolosuhteissa. Kriittiseen pyörintänopeuteen vaikuttavat roottorin massa, sen jäykkysominaisuudet, pituus sekä tuenta. (Shlyakhin 2005, 232.)

Kriittinen pyörintänopeus voidaan karkeasti arvioida kaavalla (Shlyakhin 2005, 232):

$$n_{cr} \approx 300 \sqrt{\frac{\alpha}{G}}$$

α voima, joka aiheuttaa 1 cm taipuman roottoriin [N]

G roottorin massa [kg]

Kriittisen pyörimisnopeuden 15–20% ero normaalista pyörimisnopeudesta riittää takaamaan turvallisen toiminnan, mutta yleinen käytäntö valmistajien keskuudessa on käyttää pyörimisnopeuksien erona 30-40%. Roottoreita, joiden kriittinen pyörimisnopeus on alle käyntinopeuden, kutsutaan joustaviksi roottoreiksi. Kriittisen pyörimisnopeuden ollessa yli käyntinopeusalueen roottoria kutsutaan jäykäksi. Joustavalla roottorilla varustetut turbiinit ryntäytetään nopeasti kriittisen pyörimisnopeusalueen läpi käynnistystilanteissa. Tällä vältetään roottorin taipuminen ja laakerivauriot. (Shlyakhin 2005, 233.)

Monesta eri turbiinipesästä koostuva turbiinilaitos, jossa on usea toisiinsa liitetty roottori, täytyy käsitellä yhtenä kokonaisuutena kriittisen pyörimisnopeuden suhteen. Jokainen erillinen roottori on tuettu kahdella laakerilla, joiden voiteluöljykalvon joustavuus vaikuttaa suuresti kriittiseen pyörimisnopeuteen. (Littler 2013, 98.)

5.4 Roottoreiden materiaelitekniikka

Korkeissa lämpötiloissa toimivien roottoreiden täytyy vastustaa materiaalin virumista ja olla sitkeitä. Nämä ominaisuudet aiheuttavat korkeat vaatimukset käytet-

tävälle materiaalille. Korkea- ja keskipaineturbiineiden roottoreissa käytetään ferriittistä terästä, joka on seostettu kromilla, molybdeenilla ja vanadiinilla. (Littler 2013, 94-96.)

Korkeissa lämpötiloissa toimivien turbiiniroottorien suunnittelu perustuu suurilta osin virumiseen. Roottorin valmistuksessa käytettävälle materiaalille sallitaan virumisesta johtuva 0.2% plastinen muodonmuutos 100 000 käyttötunnin ajalle. (Littler 2013, 94.)

Virumista mallinnetaan kaavalla (Littler 2013, 94):

$$\varepsilon = \sigma^n t^m e^{-B/T}$$

ε	viruma
σ	jännitys
t	aika
T	absoluuttinen lämpötila [K]
n, m, B	materiaaliin liittyviä vakioita

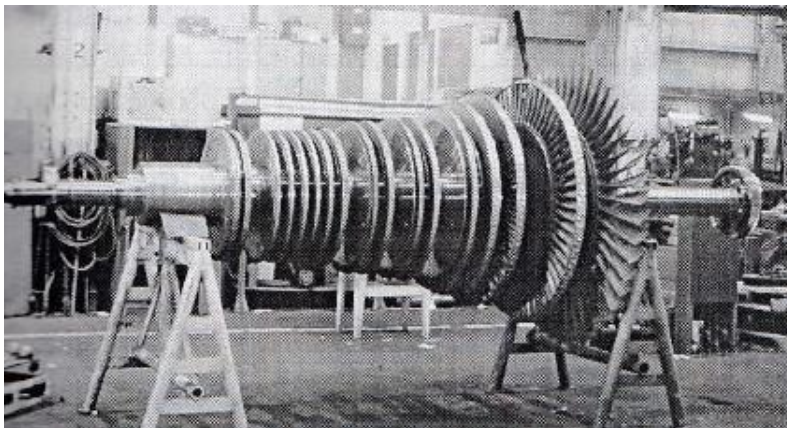
Matalapaineturbiineiden roottoreissa materiaalin viruminen ei ole matalasta lämpötilasta johtuen enää ongelma. MP-roottoreilta vaaditaan korkeaa vetolujuutta ja sitkeyttä, johtuen suurten matalapainevyöhykkeiden siipiin vaikuttavasta keskipakovoiman rasituksesta siipien kiinnityskohdissa. Näissä olosuhteissa materiaalsiksi soveltuu nikkelillä, kromilla, molybdeenilla ja vanadiinilla seostetut teräsket. (Littler 2013, 95-96.)

5.5 Aktioturbiinin roottori

Vaikka aktioturbiinien roottoreiden rakenteessa on eroa koossa, juoksupyörien halkaisijoissa, pyörien määrässä ja muissa rakenteellisissa ominaisuuksissa, voidaan nämä roottorit silti luokitella valmistusteknisesti kolmeen eri luokkaan:

- kokoonpantavat roottorit, joiden juoksupyörät kiinnitetään akseliin kutistesoitteella
- kiinteät roottorit, joiden akseli ja juoksupyörät koneistetaan aihioista kiinteäksi kokonaisuudeksi

- kiinteän- ja kokoonpantavan roottorin yhdistelmä (kuvio 24), jossa osa juoksupyöristä on koneistettu kiinteästi akseliin ja osa kiinnitetään kutistesoviteella. (Bloch & Singh 2009, 81.)



Kuvio 24. Osittain kiinteästi koneistettu roottori (Bloch & Singh 2009).

Tärkeimmät roottorin rakennetyypin valintakriteerit ovat juoksupyörän syöttöhal-
kaisija, pyörimisnopeus ja höyryn lämpötila (Bloch & Singh 2009, 81).

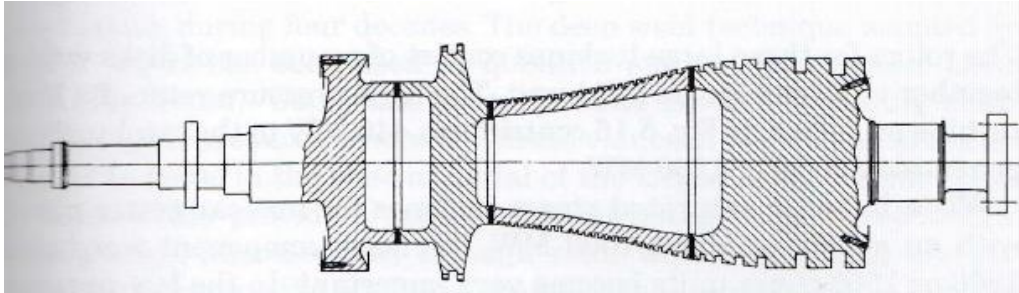
5.6 Reaktioturbiinin roottori

Reaktioturbiineiden roottorit voidaan valmistusteknisesti jakaa kiinteästi koneis-
tetuiksi roottoreiksi tai hitsatuiksi roottoreiksi. Roottorit kokoonpannaan hitsaa-
malla useasta kiinteästä kiekkomaisesta rakenteesta (kuvio 25). Nykyisin valmis-
tettavat reaktioturbiineiden rumpuroottorit ovat lähes poikkeuksetta useasta
osasta hitsattuja kokonaisuuksia. Hitsattavia roottoreita suositaan, sillä niiden yk-
sittäisiä komponentteja on helpompi käsitellä valmistuksessa sekä materiaalin ta-
salaatuisuutta pystytään valvomaan paremmin. (Bloch & Singh 2009, 95-107.)

Osista hitsatulla roottorilla on seuraavia hyviä ominaisuuksia:

- erityisen hyvä taivutusjäykkyys, joka edistää tasaista käyntiä
- matalat rakenteelliset jännitykset, sillä roottori kasataan yksittäisistä kiin-
teistä kiekkoista, joilla ei ole keskiporausta
- mahdollisuus parantaa korkealle rasitukselle altistuvien osien mekaanisia
ominaisuuksia lämpökäsittelyllä johtuen kohtuullisista ainepaksuuksista

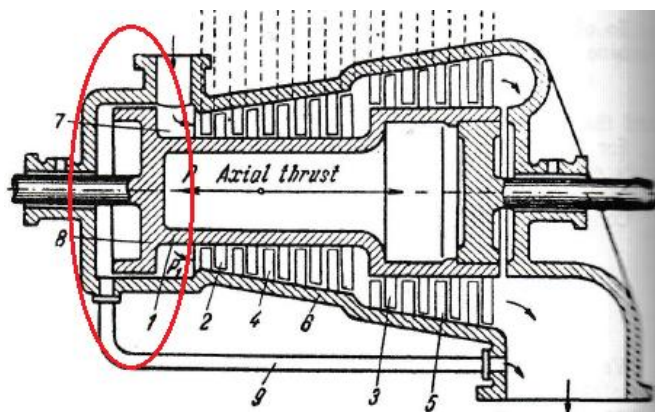
- yksittäisiä osia voidaan tarkastella ennen hitsausta ja tämä vähentää materiaalivaurioiden riskiä
- pienemmät lämpörasitukset käynnistystilanteissa. (Bloch & Singh 2009, 106.)



Kuvio 25. Osista hitsattava reaktioturbiinin roottori (Bloch & Singh 2009).

5.7 Reaktioturbiinin tasapainotusmäntä

Reaktioturbiinin juoksusiivistössä syntyvä paine-ero aiheuttaa turbiinin roottoriin merkittäviä aksiaalivoimia höyryn virtauksen suuntaan. Näitä aksiaalivoimia ei voida kumota täysin turbiinilaitoksen pesien virtaussuuntien vastakkainasettelulla vaan tarvitaan erillinen tasapainotusmekanismi turbiiniroottorille. Tasapainotusmekanismina toimii roottorin toiseen päähän koneistettu tasapainotusmäntä (kuvio 26). Tasapainotusmäntä on rakenteeltaan kiekkomainen akselin mukana pyörivä rakenne, jonka etupuolella vaikuttaa turbiiniin johdettavan höyryn paine ja männän takapuolelle johdetaan turbiinista poistuvan höyryn paine. Tämä paine-ero vaikuttaa männän pinta-alalla ja saa aikaan roottoriin kohdistuvia aksiaalivoimia kompensoivan vastakkaiseen suuntaan vaikuttavan voiman.

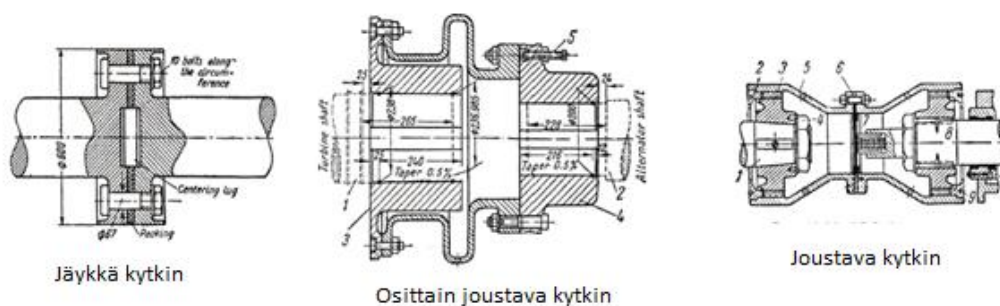


Kuvio 26. Reaktioturbiinin tasapainotusmäntä (Shlyakhin 2005).

5.8 Roottorin kytkimet

Roottori on tarpeellista kytkeä sitä seuraaviin komponentteihin, sillä ei ole mahdollista valmistaa suurta yhtenäistä turbiiniakselia roottorikomponentteineen. Materiaaliin kohdistuvat vaatimukset jännitysten ja lämpötilojen suhteen vaihtelevat suuresti isoissa monipesäisissä turbiineissa, jolloin tarvitaan erilaisilla materiaaliominaisuuksilla olevia komponentteja. Kytkimien tehtävänä on liittää turbiiniroottoreista koostuva kokonaisuus yhdeksi pyöriväksi akseliksi, joka käyttää toimilaitetta. Kytkimet välittävät ensisijaisesti vääntöä, mutta niiden muita tärkeitä tehtäviä on sallia suhteellinen sopiva epäkeskeisyys, välittää aksiaalivoimia, sekä pitää turbiinikokonaisuus aksiaalisesti paikallaan. (Littler 2013, 100-101.)

Turbiiniroottorin kytkiminä käytetään joustavia, osittain joustavia ja jäykkiä kytkimiä (kuvio 27). Joustavat kytkimet pystyvät absorboimaan pieniä määriä epäkeskeisyydestä johtuvia kuormia mutta vaativat voitelua. Joustavat kytkimet rajoittavat värähtelyn siirtymisen roottorista toiseen. Osittain joustavat kytkimet sallivat ainoastaan rajoitetusti akselin epäkeskeisyyttä kytkimeen nähden ja tämä kytkintyyppi ei vaadi voitelua. Jäykkä kytkin on taloudellisesti helpoin ratkaisu, mutta se siirtää roottorin värähtelyä toiseen roottoriin ja voi ääritapauksessa jopa muuttua itse värähtelyn lähteeksi, jos kytkinliitoksessa on epäkeskeisyyttä. (Shlyakhin 2005, 236-238.)

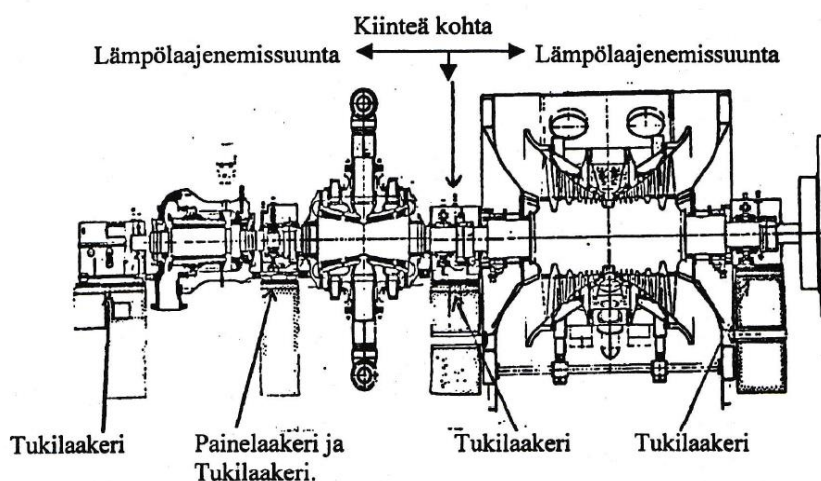


Kuvio 27. Jäykkä-, osittain joustava- ja joustava kytkin (Shlyakhin 2005).

6 Turbiinin laakerointi

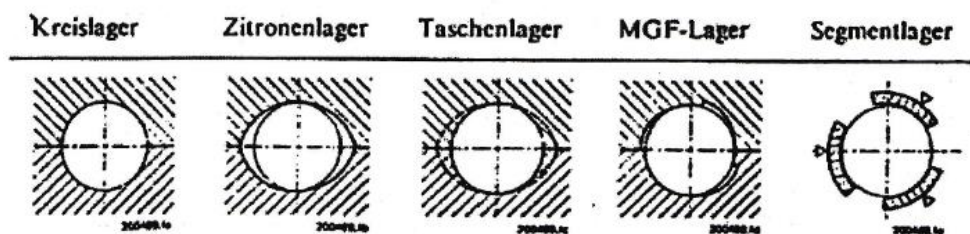
Laakerit sijaitsevat erillisissä laakeripesissä turbiinipesien molemmilla puolilla (kuvio 28). Modernit turbiinit koostuvat useista pesistä ja turbiinista muodostuu suhteellisen pitkä kokonaisuus, joka on hyvin altis lämpötilanvaihteluille. Tämän takia turbiinin kiinteiden osien ja perustan välillä täytyy olla riittävästi laajenemistilaa. Laakeripesät on kiinnitetty turbiinin perustaan ja normaalisti yksi näistä laakereista on niin sanottu kiinteä laakeri muiden laakeripesien pystyessä liikkumaan lämpölaajenemisen suuntaan. (Toivanen 1999, 40.)

Turbiinin laakeroinnin tarkoitus on keskittää roottorisysteemi oikeaan asentoon pesiin nähden ja tarjota matalakitkainen tuki, joka kestää akselin pyörimisestä aiheutuvat staattiset- ja dynaamiset kuormat, sekä kitkan ja johtuvan lämmön aiheuttavat lämpökuormat. Laakeroinnin on oltava myös huoltovapaa koneen toiminnan aikana. (Littler 2013, 105.)



Kuvio 28. Turbiinin laakerointi (Toivanen 1999).

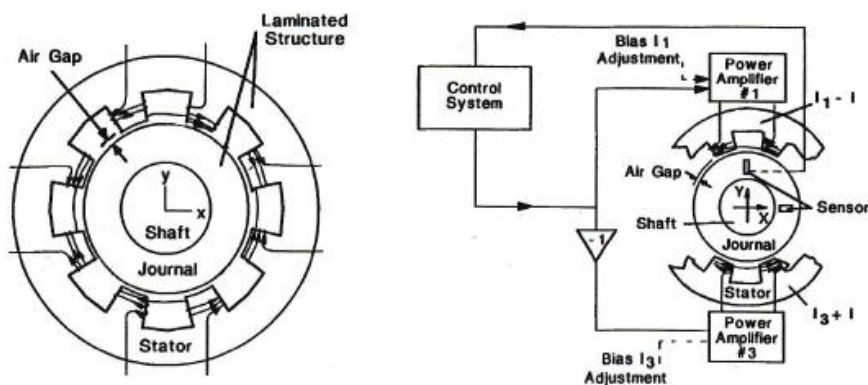
Laakerit ovat öljyllä voideltuja liukulaakereita joiden voidellut pinnat valmistetaan valkometallivalusta. Laakeripesään on jyrsitty kanavat, joita pitkin voiteluöljy virtaa laakerikuoren jakotasossa sijaitseviin avoimiin öljytiloihin. Näistä öljytaskuista pyörivä akseli saa öljyn laakeripinnan ja akselin väliin. Laakereita on kahta tyyppiä: tuki- eli radiaalilaakereita ja turbiiniakseliin vaikuttavia aksiaalivoimia kanta- via painelaakereita. Laakereiden pesissä käytetään erilaisia kaavausmalleja, joiden tarkoitus on edistää voitelukalvon muodostumista akselin ja laakerin välille (kuvio 29). (Toivanen 1999, 40-43.)



Kuvio 29. Turbiiniakselin laakeripesien erilaiset kaavausmallit (Toivanen 1999).

Uusi tekninen saavutus turbiinitekniikassa perinteiseen laakerirakenteeseen nähden on käyttää turbiinin laakeroinnissa magneettisia laakereita. Nämä laakerit mahdollistavat voitelulaitteistosta luopumisen ja korkeamman hyötysuhteen joutuessa kitkan häviämisestä laakeroinnissa. Lisäksi magneettinen laakerointi vaikuttaa enää minimaalisesti koneen värähtelymekaanisiin ominaisuuksiin. (Bloch & Singh 2009, 75.)

Magneettisen laakeroinnin toimintaperiaate on hyvin yksinkertainen: turbiiniakselin laakeroinnin vastinkohta ympäröidään sähkömagneettisilla käämillä, joilla luodaan magneettinen voima pitämään akseli paikallaan (kuvio 30). Magneettisessa laakeroinnissa turbiiniakselille asennetaan laakeroinnin vastinkappale, joka on valmistettu pinotuista ferromagneettisista kerroksista. Laakeroinnin staattoriosia valmistetaan samanlaisesta materiaalista. Akselin asentoa laakeriin nähden valvotaan käytön aikana anturoinnilla, ja korjataan tarvittaessa muuttamalla staattoriin johdettavaa sähkövirtaa. (Bloch & Singh 2009, 76-79.)

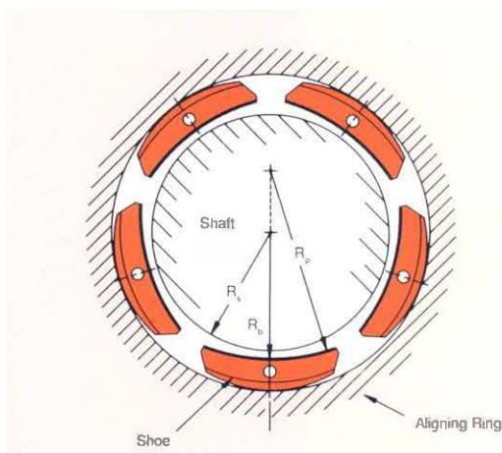


Kuvio 30. Turbiinin magneettisen laakeroinnin toimintaperiaate (Bloch & Singh 2009).

6.1 Tukilaakeri

Tuki-eli radiaalilaakeri kantaa turbiiniakselista aiheutuvat gravitaation ja pyörimisen aiheuttamat voimat. Radaalilaakeroinnin rakenteella on myös suuri merkitys turbiiniroottorin mekaaniseen värähtelyyn. Hyvällä laakeroinnin suunnittelulla voidaan saavuttaa riittävä vaimennus turbiiniroottorin mekaaniselle värähtelylle, sekä laakereissa valkometallin lämpötilat saadaan pysymään tarpeeksi matalana, kun taas huonosti toteutettu laakerointi johtaa värähtelyongelmiin tai korkeisiin laakeripintojen lämpötiloihin ja tätä kautta lisääntyneeseen huoltoaikaan. (Bloch & Singh 2009, 52.)

Tukilaakeri valmistetaan niin, että se pystyy liikkumaan rungossaan akselin kiertymän mukaan, jolloin se ei aiheuta ylimääräistä mekaanista kuormaa itse akseliin. Toinen vaihtoehto, jota valmistajat nykyisin suosivat on suunnitella laakerin erilliset valkometalliset liukupinnat akselin pintaa mukailevaksi (kuvio 31). Tällä laakerirakenteella saavutetaan erinomainen toiminnan vakaus erilaisissa koneen toimintatilanteissa. (Bloch & Singh 2009, 56-60.)



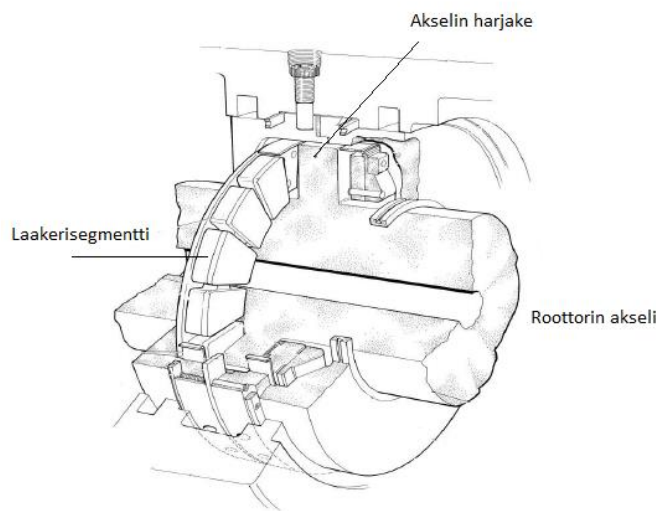
Kuvio 31. Radaalilaakeri akseliin mukautuvilla liukupinnoilla (Kingsbury Inc. 2016).

6.2 Painelaakeri

Höyryn paisunta turbiinijaksoissa aiheuttaa juoksusiivistöön voimia, jotka välittyvät akseliin aksiaalivoimana. Näitä voimia ei voida täysin kompensoida pesien virtaussuunnan vastakkainasettelulla tai reaktioturbiinin tasapainotusmännällä vaan tarvitaan erillinen painelaakerointi. Painelaakerin tehtävä on keskittää turbiinin roottori aksiaalisesti pesiin nähden ja kompensoida roottoriin kohdistuvat

aksiaalivoimat (Bloch & Singh 2009, 69). Painelaakeri sijoitetaan lähelle koneen niitä alueita, joissa pesän ja siivistöjen väliset välykset ovat erittäin pieniä ja käyntilämpötilat korkeimpia (Littler 2013, 108).

Painelaakerointi (kuvio 32) voi kantaa aksiaalivoimia molempiin suuntiin. Voima siirtyy roottorin uran tai harjakkeen kautta valkometallisiin painelaakerisegmentteihin, joista se siirtyy edelleen laakerikuoreen ja turbiinin perustaan. (Toivanen 1999, 41.)



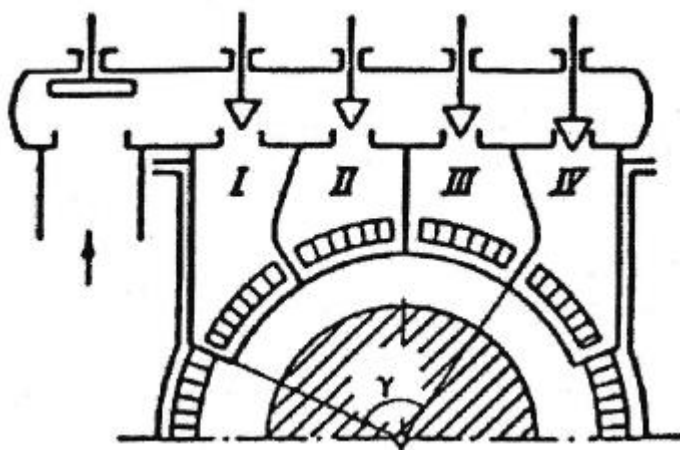
Kuvio 32. Turbiinin painelaakerointi (Littler 2013).

7 Turbiinin säätötavat

Turbiinista saatavaan tehoon vaikuttavat höyryn massavirta ja höyryn entalpia-muutos sen virratessa turbiinin läpi. Turbiinit suunnitellaan toimimaan aina va-kio-ämpöisellä höyryllä. Turbiinin säätö tapahtuu muuttamalla höyryn massavir-taa koneen läpi ja kuristamalla höyryn painetta höyryventtiilillä. Myös lauhdutti-men painetta muuttamalla voidaan vaikuttaa turbiinista saatavaan tehoon, mutta tätä keinoa rajoittavat jäähdytysveden lämpötila, lauhduttimen jäähdytyspinta-ala, turbiinin viimeiset vyöhykkeet sekä höyryn paisunnan myötä höyryn kostumi-nen. (Toivanen 1999, 45.)

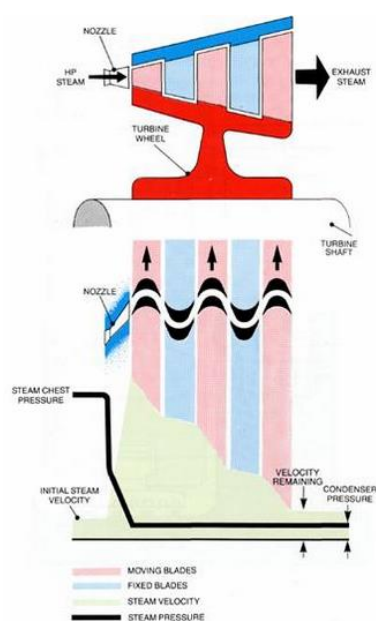
Yksinkertaisin tapa toteuttaa säätö on kuristaa koko höyryvirtausta höyryventtiilillä, joka johtaa höyryn paineen laskuun ennen siivistöä ja sen ominaistilavuuden kasvuun, jolloin siivistö täyttyy pienemmästä virtausmäärästä huolimatta. Tällöin puhutaan kuristussäädöstä (Toivanen 1999, 46).

Yleisin ja taloudellisin tapa turbiinin säätöön on osittaissäätö, jossa höyryvirrasta kuristetaan vain osaa muun virtauksen annettaessa paisua vapaasti. Tällä pääs-tään parempaan hyötysuhteeseen kuin kuristamalla koko höyryvirtausta. Osit-taissäätö toteutetaan rakentamalla turbiinin ensimmäisestä vyöhykkeestä säätö-vyöhyke, johon höyryä ohjataan usean höyryventtiilin kautta. Höyryventtiileiden avautumista säädetään kuorman mukaan yksitellen. Venttiileistä ainoastaan yksi kuristaa höyryvirtausta muiden ollessa kokonaan auki tai kiinni (kuvio 33). (Toi-vanen 1999, 47).



Kuvio 33. Turbiinin osittaissäätö (Toivanen 1999).

Jokainen höyryventtiili johtaa omalle suutinlohkolle, joiden läpi höyry virtaa turbiinin ensimmäiseen vyöhykkeeseen. Näiden osittaissäätöisten turbiineiden ensimmäistä vyöhykettä kutsutaan säätövyöhykkeeksi. Säätövyöhyke toteutetaan nopeussäätöiseksi, joka johtaa täysin erilliseen johto- ja juoksupyörätoteutukseen. Säätövyöhykkeen juoksupyörää kutsutaan curtis-pyöräksi. Curtis-pyörässä on yhteen juoksupyörään yhdistetty kaksi- tai kolme aktioperiaatteella toimivaa juoksu-siivistöä. Curtis-pyörän lohkojen välillä oleva johtosiivistö ainoastaan kääntää höyryn virtaussuuntaa, höyryn nopeus ei kasva tämän rakenteen johtosiivissä (kuvio 34).



Kuvio 34. Osittaissäätöisen turbiinin säätövyöhyke (Littler 2013).

Curtis-pyörän käyttö suojaa turbiinin pesää ja roottoria korkeammilta paineilta ja lämpötiloilta, koska suuri osa höyryn lämmöstä ja paineesta absorboituu säätövyöhykkeen rakenteisiin. Tämän takia säätövyöhykkeen komponentit koneistetaan kiinteistä aihioista ja tehdään erittäin lujatekoisiksi. Tällaisen rakenteen käyttö mahdollistaa korkeapaineturbiinin suunnittelun lyhemmäksi ja alhaisemmat rakennuskustannukset. (Littler 2013, 66.)

Muita säätötapoja ovat turbiinin rakenteen ulkopuoliset säädöt, joissa ohjataan voimalaitoksen kattilapiirin painetta (Toivanen 1999, 50-51).

8 Höyryventtiilit

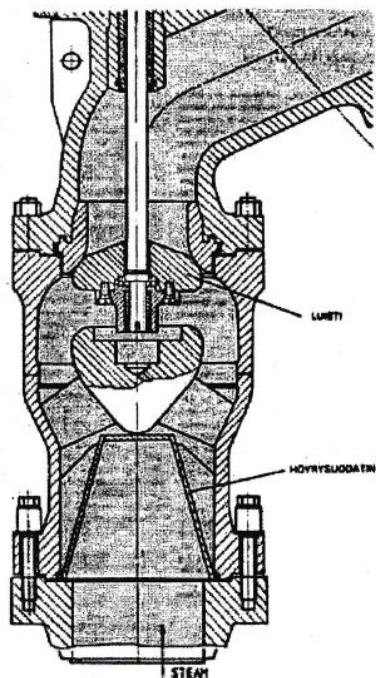
Höyry tuodaan voimalaitoksen kattilarakenteista turbiinille tuorehöyryputkea pitkin. Ennen turbiinia ja sen säätöventtiileitä sijaitsee häiriötilanteita varten oleva turbiinilaitoksen pikasulkuventtiili tai venttiilit riippuen konstruktiosta. Pikasulun jälkeen höyry ohjataan turbiinin tulopuolen tuorehöyryventtiileille, joista se ohjataan lopulta suutinlohkojen kautta turbiiniin.

Pikasulkuventtiilin tarkoitus on katkaista höyryn syöttö turbiiniin häiriötilanteissa, jotka voivat aiheuttaa koneelle mekaanisia vaurioita. Normaalissa toiminnassa pikasulkuventtiili pysyy auki öljynpaineen vaikutuksesta. Häiriötilanteessa tämä paine poistetaan nopeasti venttiilin pitopuolelta ja se saa aikaan nopean venttiilin sulkeutumisen jousivoiman vaikutuksesta. Pikasulun toimimista vaativia tilanteita ovat:

- liian korkea pyörimisnopeus
- aksiaalilaakerin kulumisesta johtuva liika roottorin aksiaalsiirtymä
- voitelu- ja säätelyöljyjärjestelmän painen laskeminen liian matalaksi
- tuorehöyryn lämpötila nähden koneen materiaalien lämpötilaan
- generaattorin suojaukset
- kattilapiirin suojaukset
- liian korkea lauhdutinpaine
- voimakkaat mekaaniset värähtelyt
- turbiinipesän väliottojen häiriötilat. (Toivanen 1999, 55-56.)

Pikasulkuventtiilin jälkeen höyry ohjautuu säätöventtiileille, joiden tarkoitus on säätää koneeseen ohjattavaa höyryvirtausta sähköverkkoon kytketyn generaattorin kuormituksen perusteella. Höyryventtiileiden virtauskanavat suunnitellaan niin, että ne rajoittavat höyryn loppunopeuden venttiilirakenteissa 120 m/s. Venttiilin komponentit suunnitellaan myös niin, ettei höyryvirtaus aiheuta värähtelyjä venttiilin rakenteisiin. (Littler 2013, 142.)

Höyryventtiilit (kuvio 35) varustetaan höyrysuodattimilla, joiden tarkoitus on estää vieraiden partikkeleiden kulkeutuminen höyryvirtauksen mukana turbiinin sisäisiin rakenteisiin. Suodatinverkkojen tiheydet ovat välillä kahdesta viiteen millimetriin ja jopa tämän kokoiset partikkelit voivat aiheuttaa vakavia mekaanisia vaurioita turbiinin siivistöissä. (Littler 2013, 143.)



Kuvio 35. Tuorehöyryventtiilin rakenne (Toivanen 1999).

Venttiilin materiaaleina käytetään kromi- molybdeeni ja vanadiiniseosteisia teräksiä, joilla saadaan rakenne kestäämään tuorehöyryn korkeita lämpötiloja. Itse venttiili ja sen istukkapinta ovat stelliittikäsiteltyjä, jolla saavutetaan kestävyyttä höyryvirtauksen aiheuttamaa eroosiota vastaan. (Littler 2013, 142.)

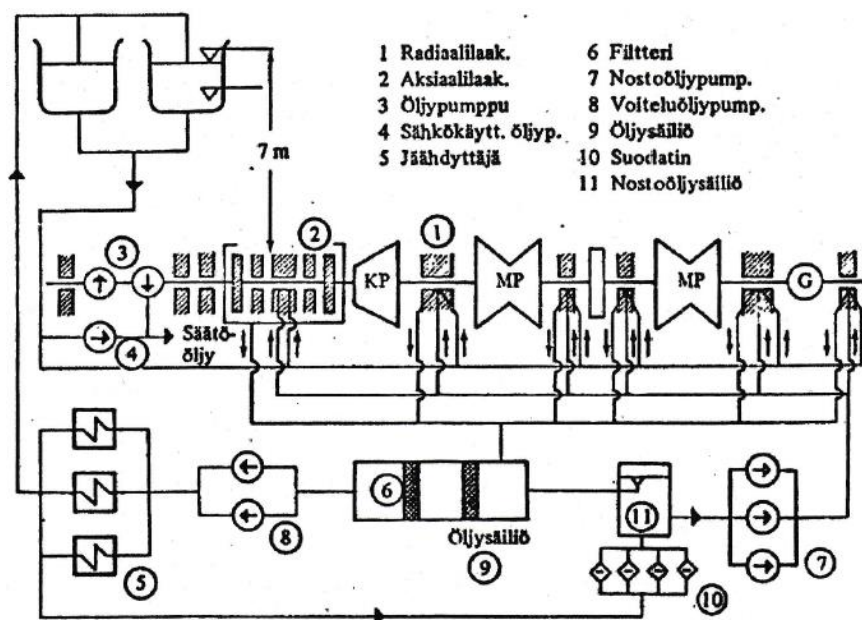
9 Turbiinin voitelujärjestelmä

Turbiinin yhteyteen rakennetaan yleensä yksi mekaaninen öljyjärjestelmä, joka saa käyttövoimansa turbiiniakselilta (kuvio 36). Öljyjärjestelmällä luodaan voitelu turbiinin laakeroinnille, sekä öljynkierto hydraulisille käyttölaitteille turbiinin säätöön. Käynnistysten ja hätätilanteiden takia voitelujärjestelmät varustetaan sähkökäyttöisillä pumpuilla. Turbiineissa käytetään myös nostoöljyjärjestelmää, jolla käynnistuksen yhteydessä vältetään laakereiden ja akselin välistä kuivahan-kausta ja pienennetään paaksauslaitteen tarvitsemaa vääntömomenttia. (Toivanen 1999, 43- 44.)



Kuvio 36. Turbiiniakselin päässä sijaitseva pääöljypumppu.

Pumppujen lisäksi öljyjärjestelmä (kuvio 37) sisältää öljynsuodattimet ja laakeri-öljyn jäähdyttimen. Näiden laitteiden toiminta varmistetaan varustamalla järjestelmä varalaitteilla, jotka voidaan hätätilanteen sattuessa ottaa käyttöön vaihtoventtiilillä. (Toivanen 1999, 44.)



Kuvio 37. Turbiinin öljyjärjestelmä (Toivanen 1999).

Öljyn tehtävä voitelun lisäksi on jäähdyttää laakerointia ja estää korroosiota. Öljyn merkittäviä ominaisuuksia ovat öljyn viskositeetti sekä hapettumisen- ja emulgoitumisen vastustaminen. Viskositeetti vaikuttaa turbiinin laakerihäviöön, tavallista onkin käyttää kevyitä öljyjä häviön pienentämiseksi. Viskositeettiin vaikuttaa voimakkaasti öljyn lämpötila, jonka suositeltu arvo on noin 40°C ennen laakeria. Hapettuminen aiheuttaa öljyn voiteluominaisuuksien heikkenemisen. Hapettumista edistävät ilma, vesi, erilaiset metallit sekä korkeat lämpötilat. Öljyyn lisätään lisäaineita estämään hapettumista. Emulgoitumisessa öljyyn kerääntynyt vesi muiden epäpuhtauksien kanssa heikentää öljyfilmin lujuutta laakereissa. (Toivanen 1999, 45.)

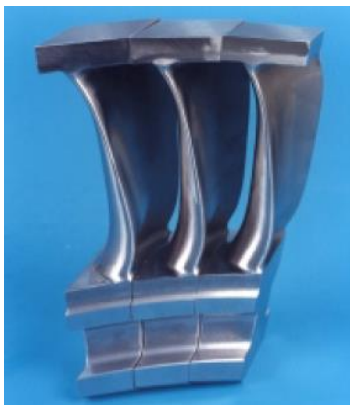
10 Turbiinin juoksusiivet

Turbiinin juoksusiivistö on koneen rasitetuin kokonaisuus, jonka tulee kestää korkeat lämpötilat, höyryvirtauksen aiheuttama taivutusrasitus, värähtelyrasitus, höyryn paisunnan edetessä höyryyn muodostuvien vesipisaroiden aiheuttama eroosiovaikutus sekä syöpymistä. Höyryn ja lämpötilojen aiheuttamien rasitusten lisäksi juoksusiipiin vaikuttaa voimakkaasti keskipakovoiman aiheuttama vetojännitys. (Toivanen 1999, 26.)

Turbiinissa on useita rakenteellisesti erilaisia siivistöjä, jotka toimivat vuorotellen johto- ja juoksusiivistöinä. Siivistöjen rakenteet ovat erilaisia aktio- ja reaktiovyöhykkeissä. Tämän lisäksi matalapaineturbiinin viimeisten vyöhykkeiden pitkät siivet rakennetaan toimimaan aktio- ja reaktioperiaatteella, jotta näiden vyöhykkeiden hyötysuhteet saadaan optimoitua mahdollisimman korkeiksi. Siipien pituudet kasvavat voimakkaasti korkeapainevyöhykkeistä edeten matalapainevyöhykkeitä kohden paisuneen höyryn tilavuuden muutoksen takia. Nykyisissä turbiineissa puhtaita aktiovyöhykkeitä käytetään enää turbiinin alkupäässä säätövyöhykkeessä johtuen reaktiovyöhykkeen paremmasta hyötysuhteesta (Larjola 2008, 112).

10.1 Aktiovyöhykkeiden siivet

Aktiovyöhykkeiden juoksusiipiin kohdistuu höyryvirtauksen aiheuttamaan resonointia sekä voimakasta taivutusjännitystä. Nämä yhdessä altistavat rakenteen värähtelystä aiheutuvaan materiaalin väsymiseen. Tämän takia yksittäin valmistetut juoksusiivet tehdään erittäin tukeviksi. Siivet kiinnitetään akselilla sijaitsevan juoksupyörän muotoon koneistettuun uraan. Siipien päät yhdistetään toisiinsa kehärenkaalla, jonka tarkoitus on jäykentää siivistön rakennetta värähtelyjen takia sekä toimia höyrytiivistyksenä. (Littler 2013, 65.) Kehärenkaat eivät ole yhtenäisiä kokonaisuuksia, vaan ne koostuvat tietyn pituisista paloista, joka mahdollistaa vapaan lämpölaajenemisen. Moderneissa siivistöissä erillisen kehärenkaan on korvannut siipiin valmiiksi koneistettu kehärengasrakenne (kuvio 38).



Kuvio 38. Rakenteeseen integroitu kehärengasrakenne (Pollak, Pfitzinger, Thamm & Schwarz 2016).

Aktiovyöhykkeitä käytetään yleisemmin korkeapaineturbiinien ensimmäisissä jaksoissa, joissa höyryn paineet ja lämpötilat ovat korkeita, jonka takia rakenteelta tarvitaan erittäin suurta kestävyyttä. Johtuen kuuman ja korkeapaineisen höyryn pienestä tilavuudesta aktioturbiinien siivistöt ovat usein pienikokoisia verrattuna myöhempään turbiinijaksoihin (kuvio 39).



Kuvio 39. Aktioturbiinin pienikokoiset siivet juoksupyöriin kiinnitettyinä (Dresser-Rand 2016).

10.2 Reaktiovyöhykkeiden siivet

Reaktiovyöhykkeiden siivet kiinnitetään suoraan rumpumaiseksi tehdyn roottorin koneistettuihin kiinnitysurisiin. Höyryn paineenmuutoksen tapahtuminen johtosiihistön lisäksi juoksusiivistössä sulkee pois kiekkomaisen juoksupyörärakenteen käytön reaktiovyöhykkeissä.

Reaktiosiivistöön vaikuttavat voimat johtuvat suurimmaksi osaksi höyryvirtauksen kiihtymisen aiheutuvasta reaktiovoimasta, joka pysyy vakiona. Siivistöön kohdis-

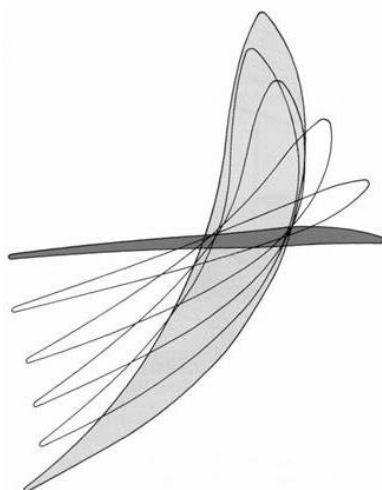
tuva höyryvirtauksen aiheuttama resonointi on pienempää kuin aktiovyöhykkeissä, joten värähtelystä johtuvan väsymisrasituksen riski on pienempi ja korkeammat taivutusjännitykset eivät ole niin haitallisia. (Littler 2013, 65.) Reaktiovyöhykkeitä esiintyy suurimmaksi osaksi keski- ja matalapaineturbiineissa, mutta myös korkeapaineturbiineiden viimeisissä jaksoissa.

10.3 Matalapainevyöhykkeiden pitkät siivet

Höyryn paisuessa turbiinin läpi sen tilavuus kasvaa edetessä matalapaineosia kohti ja tästä johtuen täytyy myös siivistön poikkipinta-alan kasvaa. Tämä johtaa siipien pituuden ja roottorin läpimitan kasvuun, joka taas aiheuttaa merkittävää keskipakovoimasta johtuvaa vetojännitystä siipiin. (Toivanen 1999, 28.)

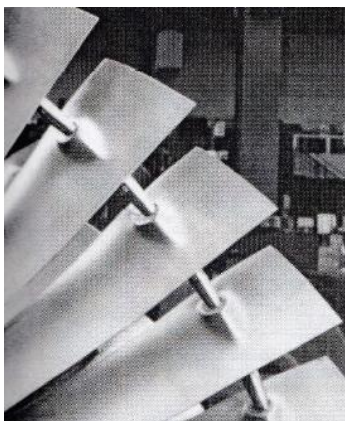
Pitkät siivet toimivat osittain aktio- ja reaktioperiaatteella. Siipien alkupäässä aktioperiaate on vallitsevampi ja toiminta reaktioperiaatteella kasvaa siiven pituuden myötä. (Littler 2013, 11.)

Pitkien siipien leikkauksen poikkipinta-ala pienenee siiven kiinnityskohdasta kärkeä kohden. Tällä tavalla saadaan hallittua siipeen kohdistuvaan keskipakovoiman aiheuttamaan rasitusta. Siiven pituudesta johtuen kehänopeudet siiven eri kohdissa vaihtelevat. Tämän takia siiven virtauskulmia muutetaan siiven matkalla, että siipi saataisiin kokonaisuudessaan toimimaan, joka johtaa siiven rakenteen muodon muuttumiseen pituuden myötä (kuvio 40). (Toivanen 1999, 30.)



Kuvio 40. Siipikulman muutos ja poikkipinta-alan kapeneminen pitkissä turbiini-siivissä (Littler 2013).

Pitkät siivet ovat erittäin alttiita värähtelyjen aiheuttamille väsymisrasituksille. Värähtelyjen vaimentamiseen siivistöissä käytetään sidoslankaa tai kehävannetta, jolla saadaan jäykistettyä koko siivistö värähtelyjä vastustavaksi kokonaisuudeksi (kuvio 41). Siivistö on mahdollista myös tukea koneistamalla siipiin ulokkeet, jotka liittävät siivet kiinteästi toisiinsa, mutta tämä toteutus vastustaa höyryn virtausta ja johtaa alempaan hyötysuhteeseen (kuvio 42).



Kuvio 41. Pitkien siipien tukeminen sidoslangalla (Bloch & Singh 2009).



Kuvio 42. Turbiinisiipeen koneistettu uloke siivistön tukemista varten.

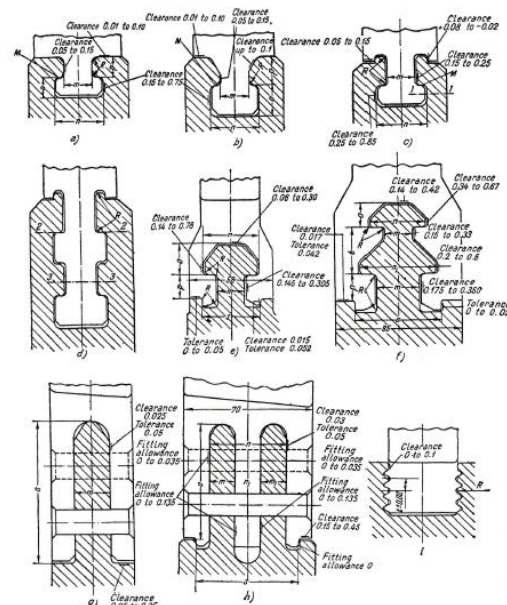
10.4 Siipiin kohdistuvat rasitukset

Juoksusiivistö on turbiinin hyvin monimutkaisesti kuormitettu kokonaisuus. Siipiin kohdistuu keskipakovoiman, höyryvirtausten, lämpörasitusten ja värähtelyiden aiheuttamaa kuormitusta, joiden laskenta on hyvin monimutkaista ja haastavaa

suunnittelun näkökulmasta. Siipien materiaali altistuu myös virumiselle korkeissa lämpötiloissa toimivissa turbiinijaksoissa. Kaasudynaamisesti siivistön on lisäksi toimittava mahdollisimman hyvällä hyötysuhteella ja tämä aiheuttaa siipiin monimutkaisia rakenteita varsinkin matalapainevyöhykkeiden pitkissä siivissä. Siipiin kohdistuvat korkeat rasitukset vaativat tukevat kiinnitykset siivistöille roottorissa. Nämä vaatimukset saadaan täytettyä koneistamalla roottoriin kiinnitysuria (kuvio 43) ja käyttämällä erilaisia siiven kiinnitystapoja (kuvio 44).

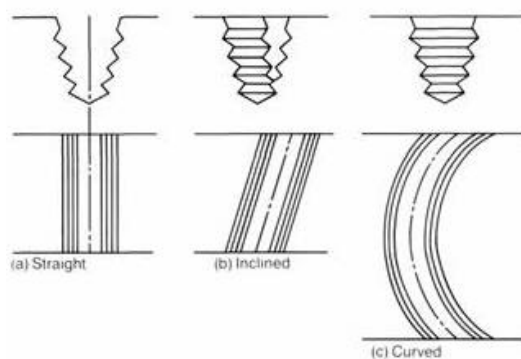


Kuvio 43. Turbiiniroottorin siivistöjen kiinnitysurat (Larjola 2008).



Kuvio 44. Siipien erilaiset kiinnitystavat (Shlyakhin 2005).

Kiinnitysurat voidaan koneistaa suoriksi, vinoiksi tai kaareviksi (kuvio 45). Suorat urat soveltuvat lievästi kärjestään kaareville siiville. Vinoja sekä kaarevia uria käytetään pitkille, poikkileikkaukseltaan voimakkaasti muuttuville siiville. (Littler 2013, 69-70.)



Kuvio 45. Siipien kiinnitysurien muotoilu roottorissa (Littler 2013.)

10.5 Mekaaniset rasitukset

Siipiin vaikuttavat keskipakovoiman sekä höyryvirtauksen aiheuttamat veto- ja taivutusjännitykset. Keskipakovoima aiheuttaa vetojännityksen siipien poikkileikkaukseen sekä taivutusjännitystä siipiin, joiden massakeskipiste sijaitsee siiven radiaalisen keskilinjan ulkopuolella. Höyryvirtaus aiheuttaa siipien kiinnityskohtiin kuormituksen mukaan vaihtelevaa taivutusjännitystä. Keskipakovoiman aiheuttamat jännitystilat siivissä ovat staattisia rasituksia, höyryvirtauksen aiheuttama kuormitus on dynaamista rasitusta. Siivet suunnitellaan kestäväksi nämä molemmat rasitustilat. Keskipakovoimasta johtuvaa rasitusta aiheuttavat siiven oman massan lisäksi siivistön päiden kehävanteet ja pitkien siipien sidoslangat. (Shlyakhin 2005, 210.)

10.6 Siipien värähtelymekaniikka

Turbiinin johtolaitteistosta virtaava höyry aiheuttaa juoksusiipiin vaihtelevaa rasitusta, joka saa aikaan värähtelyä siipirakenteissa. Värähtely on mahdollista tapahtua yksittäisessä siivessä, tai jollain kiinnitysmekanismilla yhdistetyssä siivistössä. Värähtely voi tapahtua erilaisissa muodoissa, joita ovat:

- tangentialinen värähtely, jossa siivet värähtelevät kiinnityskohdan tason myötä. Tämä on värähtelyn yleisin muoto
- aksiaalinen värähtely, jossa siivet värähtelevät kiinnityskohdan tasoon nähden aksiaalisesti. Tämä värähtely on erittäin harvinainen värähtelymuoto ja liittyy läheisesti aktioturbiineiden juoksupyörärakenteeseen

- vääntöväärähtely, jossa siivet pyrkivät kääntyilemään oman geometrisen keskiakselinsa ympäri. Tätä väärähtelyä esiintyy lähinnä vaihtelevalla poikileikkauksella olevissa turbiinisiivissä, kuten matalapaineturbiinien pitkissä siivissä. (Shlyakhin 2005, 215.)

Siipien väärähtelyä aiheuttaa höyryvirtauksen epätasaisuus sen virratessa ulos turbiinijaksojen johtorakenteista, joka johtaa vaihteleviin häiriövoimiin juoksusiivissä. Tämä voi johtua monenlaisista eri syistä, mutta seuraavat ovat yleisimpiä:

1. Epätasaiset paineet, höyryn nopeuden tai virtauskulmien muuttuminen joista aiheutuu epätasaisia voimia juoksupyörissä. Näitä aiheuttaa:
 - höyryn syöttö säätövyöhykkeeseen vain osalle juoksupyörästä turbiinin osasäädössä
 - höyryn virtaussuunnan muutos aksiaalisesta radiaaliseksi. Tätä voidaan minimoida hyvällä siipien aerodynaamisella suunnittelulla
 - höyryvirtauksen häiriöt johtuen turbiinipesän välitoista.
2. Turbiinin sisäisistä rakenteista johtuvat jaksolliset vaikutukset:
 - johtolaitteiston epäkeskeisyys juoksusiivistöön nähden
 - höyryn vuoto johtolaitteiston labyrinthiivistyksessä seuraavaan turbiinijaksoon
 - johtolaitteiston rakenteiden laadun epätasaisuus.
3. Höyryvirtauksen aiheuttama aerodynaamisten voimien vaihtelu juoksusiivistössä, joka voi johtua:
 - akustisesta resonoinnista ja höyryn pyörteilystä virtauskanavissa
 - höyryvirtauksen epätasaisuudesta johtolaitteistoista juoksusiipiin
 - virtauskanavien vaihtelevasta pinnanlaadusta
 - kostean höyryn alueella toimivien vyöhykkeiden vesieroosiosta. (Littler 2013, 86.)

Siipien värähtelyä aiheuttavat voimat, jotka esiintyvät koneen pyörimisnopeutta ja johtokanavien määrää vastaavalla taajuudella. Siipien suunnittelussa häiriöitä aiheuttavia värähtelymekaanisten voimien esiintymistaajuuksia voidaan mallintaa seuraavalla kaavalla (Shlyakhin 2005, 217):

$$f = nz$$

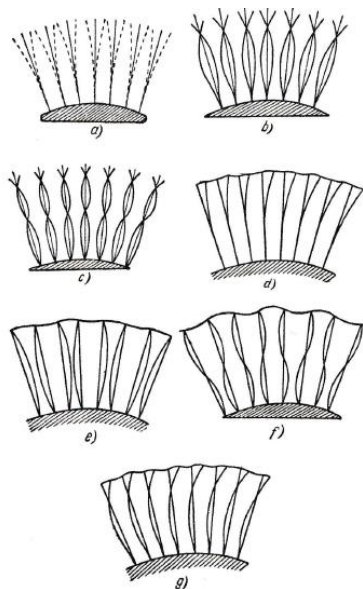
f siiven värähtelytaajuus käytön aikana

n turbiinin pyörimisnopeus sekuntia kohden [1/s]

z johtolaitteiston kanavien määrä kyseisessä kohdassa

Tällä menetelmällä voidaan siivet suunnitella toimimaan vaarallisten värähtelytaajuuksien ulkopuolella. (Shlyakhin 2005, 216-217.)

Kuviossa 46 esitellään erilaiset siipien ja siivistöjen värähtelymuodot. Nämä ovat tangentialista värähtelyä. Vaarallisimmat värähtelymuodot siipirakenteille ovat kohdissa a, d ja e esitetyt tapaukset. (Shlyakhin 2005, 216.)



Kuvio 46. Turbiinin juoksusiipien erilaiset tangentialiset värähtelyt (Shlyakhin 2005).

10.7 Siipimateriaalit

Turbiinisiipien materiaalilta edellytetään korkeita mekaanisia ominaisuuksia. Materiaalin täytyy kestää siihen kohdistuvat mekaaniset, termiset sekä eroosion aiheuttamat rasitukset.

Väsymisluku muodostuu erittäin tärkeäksi tekijäksi materiaalilta vaadittavissa ominaisuuksissa, sillä suurin osa siipien rikkoutumisesta johtuu materiaalin väsymisestä dynaamisessa rasituksessa. Värähtelynäkökohdista tarkasteltuna, materiaalilta vaaditaan hyvää vaimennuskykyä värähtelyä vastaan. Näitä materiaallivaatimuksia vastaa hyvin ruostumaton teräs johon, on seostettu 12 % kromia. Tällä kromiteräksellä on erinomainen vaimennuskyky värähtelyitä vastaan. (Littler 2013, 84.)

Siivet altistuvat keskipakovoiman takia korkeille vetojännitykselle siipiprofiilin poikkileikkauksessa. Siipien kiinnityskohtien lovimuotoihin muodostuu korkeita jännityskeskittymiä, jotka aiheuttavat materiaalivalinnalle haasteita, sillä korkeat materiaalin vetolujuudet myös kasvattavat loviherkkyyttä. (Littler 2013, 84-85.)

Korkeapaineturbiineiden kuumissa olosuhteissa toimivat siivistöt altistuvat korkeille lämpötiloille, jolloin viruminen muodostuu tärkeäksi tekijäksi materiaallivaatimuksissa näissä olosuhteissa. Materiaalille sallitaan virumisesta aiheutuva plastinen 0.2 % muodonmuutos 100 000 käyttötunnin ajalle. Kromiseosteiset teräkset ovat ideaalisia materiaaleja turbiinisiiville, edellyttäen lämpötilan pysyvän alle 480°C. Virumiselle altistuvien korkeapaineturbiinin siipien mekaanisia ominaisuuksia voidaan parantaa seostamalla teräkseen molybdeenia ja vanadiinia, sekä käyttämällä sopivaa lämpökäsittelyä. (Littler 2013, 84-85.)

Erityisen korkeissa lämpötiloissa toimiville korkeapaineturbiineiden siiville soveltuu lämpökäsiteltävä martensiittinen kromiteräs, joka on seostettu molybdeenilla ja vanadiinilla. Tällä seosaineistuksella on mahdollista valmistaa siipiä, jotka pysyvät pitämään virumislujutensa aina 650°C asti. Keskipaineturbiineille, jotka eivät altistu niin suurille lämpö- ja mekaanisille kuormille, voidaan käyttää siipimateriaalina vähemmän seostettuja kromiteräksiä. (Littler 2013, 84-85.)

Titaani on potentiaalinen vaihtoehto matalapaineturbiineiden pitkien siipien valmistusmateriaaliksi sen korkeasta lujuus/paino- suhteesta johtuen. Titaania käyttämällä matalapaineturbiineiden viimeisistä siivistä on mahdollista tehdä pitempiä kuin normaalista kromiseostetusta teräksestä johtuen materiaalin keveydestä ja

näin ollen pienemmästä keskipakovoiman aiheuttamasta rasituksesta siiven kiinnityskohtaan. Titaanilla on myös parempi korroosion vastustuskyky märän höyryn aiheuttamaa eroosiota vastaan, sekä lähes kaikki mekaaniset ominaisuudet ovat parempia kuin seostetulla kromiteräksellä. (Littler 2013, 84-85.)

Haasteet titaatin käytössä johtuvat sen huonosta koneistettavuudesta ja hitsattavuudesta sekä kalliista hinnasta. Huonoin puoli titaania verrattaessa kromiteräksiin on sen huonot ominaisuudet värähtelyn suhteen. Titaatin vaimennusominaisuudet ovat jopa 40 % huonommat kuin kromiterästen. Tämä johtaa lisääntyneeseen riskiin värähtelyrasituksille siiven toimiessa lähellä ominaistaajuuksiaan. (Littler 2013, 84-85.)

Eroosion takia viimeisten matalapainevyöhykkeiden siivissä käytetään höyryn tulolaidassa vahvistettuja alueita (kuvio 47), joiden tarkoitus on absorboida matalapaineisen kostean höyryn mukanaan kuljettamien vesipisaroiden liike-energiaa ja näin estää eroosiovaikutusta itse siivessä. Nämä alueet tehdään joko pintakarkaisulla tai elektronisuihkuhitsauksella. Materiaalina näissä suojauksissa käytetään volframia, työkalulaatuista kromiterästä tai stelliittiä. (Littler 2013, 85.)



Kuvio 47. Eroosiosuojattu turbiinisiipi (Stork Turbo Blading 2016).

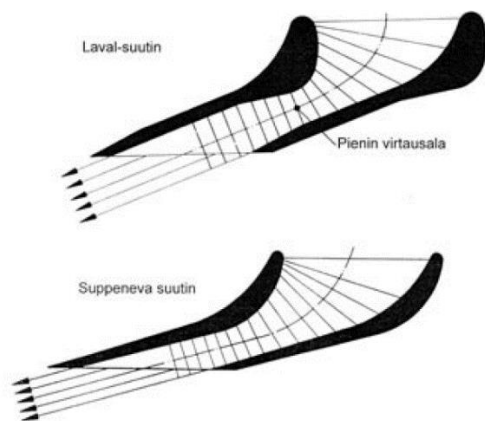
11 Höyryn johtolaitteisto

Turbiinin juoksusiivistöön höyry johdetaan joko erillisten suutinlohkojen (kuvio 48) kautta tai juoksusiivistöä edeltävästä johtosiivistöstä. Suuttimet on sijoitettu turbiinin höyryn tulopuolen kanavistoon ja ne edeltävät turbiinin ensimmäistä jaksoa eli säätöjaksoa. Turbiinin johtosiivistö kiinnitetään turbiinipesään koneistettuihin uriin.



Kuvio 48. Turbiinin suutinlohkoja.

Höyry virtaa johtolaitteiston kanavissa paine-eron ansiosta. Höyryn paisunnan myötä johtolaitteistossa höyry laajenee ja vapautuva energia lisää höyryn nopeutta. Tiettyyn painesuhteeseen asti höyryvirtauksen nopeus kasvaa nopeammin kuin sen ominaistilavuus ja virtaus suuttimesta tapahtuu ilman pyörteilyä. Suuttimen jälkeisen vastapaineen jäädessä pienemmäksi kuin kriittinen virtauspaine, virtausta normaalista suppenevasta suuttimesta ei saada muutettua kokonaan nopeusenergiaksi, vaan pyörteily ja sisäinen kitka muuttaa osan energiasta lämmöksi. Tällaisessa tapauksessa käytetään laajenevaa Laval-suutinta (kuvio 49), joka ohjaa höyryn paisuntaa edelleen suuttimen pienemmän poikkipinnan jälkeen. (Huhtinen 2013, 114.)



Kuvio 49. Laval-suuttimen rakenne verrattuna normaaliin suppenevaan suuttimeen (Huhtinen 2013).

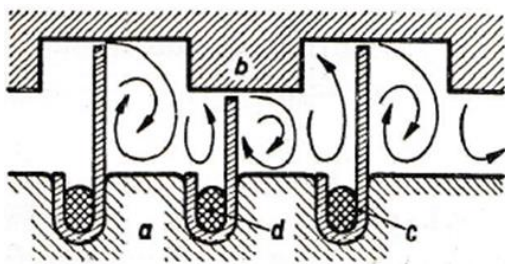
Johtolaitteena voidaan käyttää valamalla tehtyjä suuttimia höyryn lämpötilan ollessa alle 350°C. Höyryn lämpötilan ylittäessä tämän arvon käytetään koneistettuja suutinryhmiä. Korkeissa lämpötiloissa toimivien turbiineiden suutinlohkot hitsataan turbiinin kuoreen. (Huhtinen 2013, 123.)

Turbiinin säätöjakson jälkeiset johtolaitteistot ovat kiekkomaisiin rakenteisiin kiinnitettyjä johtosiivistöjä. Nämä johtolaitteet suunnitellaan niin, että ne on mahdollista halkaista turbiinipesien jakotason kohdalta. Johtolaitteet kiinnitetään turbiinipesään koneistettuihin uriin käyttäen erilaisia sovitteita ja kiinnitysmekanismeja. Johtosiivistöt suunnitellaan niin, että ne pystyvät laajenemaan vapaasti radiaalisesti sekä aksiaalisesti ja ovat aina keskitettynä turbiiniakselin keskiöön (Huhtinen 2013,123).

Johtosiivissä syntyvän höyryn paine-eron takia aktiovyöhykkeiden johtosiivistö kiinnitetään vankkarakenteisiin kiekkomaisiin seinämiin, jotka erottavat turbiinivyöhykkeet toisistaan. Näiden seinämien tehtävä on myös luoda höyrytiivistys turbiinijaksojen välille. Reaktioturbiineiden johtosiivistöihin ei kohdistu yhtä suuria paine-eroja kuin aktioturbiineissa, joten nämä siivistöt eivät tarvitse niin jyrkää kiinnitysrakennetta. Johtolaitteiston höyrytiivistys turbiiniakseliin nähden toteutetaan labyrinttiivistyksellä, jota käsitellään luvussa 12.

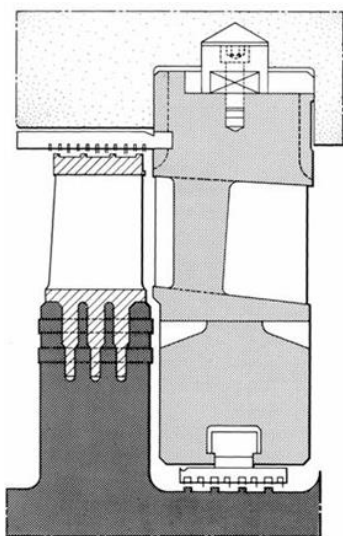
12 Turbiinin tiivistys

Turbiinin rakenteessa huomioidaan höyryvuotojen estäminen kiinteiden ja pyöri-
vien osien välillä, sekä vuotaminen akselin vierestä koneen ulkopuolelle tai ulkoil-
man vuotaminen matalapaineosiin. Koneen sisäiset höyryvuodot, joissa höyry
ohittaa siivistöt työtä tekemättä pyritään pitämään mahdollisimman pieninä. Ko-
neen ja ulkoilman väliset vuodot aiheuttavat pahimmillaan jopa turvallisuusris-
kejä. Turbiinin yleinen käyttövarmuus riippuu suuresti tiivisteiden rakenteesta ja
kunnosta. (Toivanen 1999, 33.) Turbiinin yleisimpänä tiivisteenä käytetään laby-
rinttitiivistettä (kuvio 50), jonka periaatteena on pakottaa höyry kulkemaan monen
kapean raon kautta, jotka on järjestelty ja muotoiltu tekemään virtauksen kulku
hankalaksi (Nygren 1964, 312).



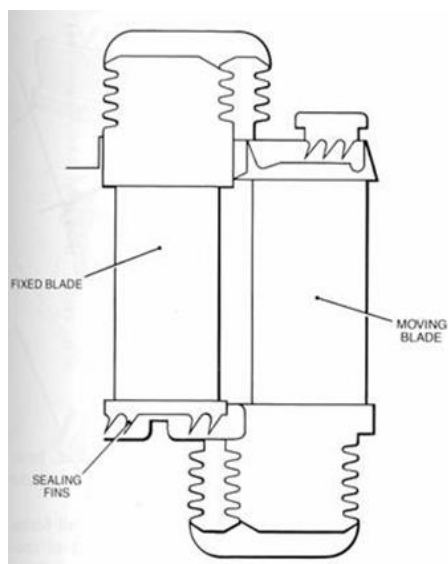
Kuvio 50. Labyrinttitiivisteiden toimintaperiaate (Nygren 1964).

Aktiovyöhykkeissä suurin huomio tiivistyksessä on johtosiipien ja akselin väli,
koska johtosiipien yli on paine-ero, joka aiheuttaa helposti vuotoja (Toivanen
1999, 33). Tiivistyksessä käytetään labyrinttitiivistettä (kuvio 51).



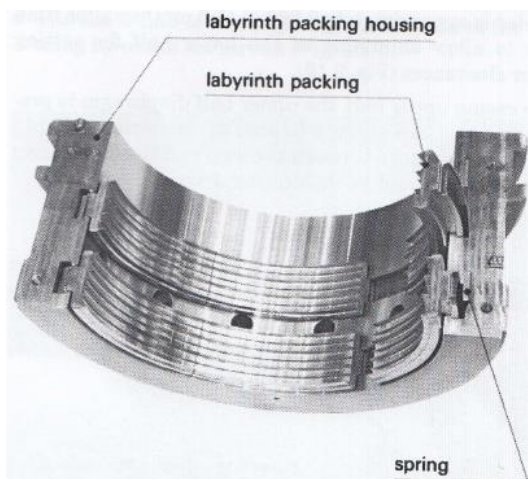
Kuvio 51. Aktiovyöhykkeen labyrinttitiivistys (Littler 2013).

Reaktiovyöhykkeissä höyryn paineenmuutosta tapahtuu johto- ja juoksusiivittäessä. Tämä paine-ero paikallaan pysyvien johtolaitteistojen ja pyörivien osien välillä saa aikaan virtauksen, jota kutsutaan rakohäviöksi. Jotta rakohäviö saataisiin pysymään mahdollisimman pienenä, tehdään johto- ja juoksusiivittäisiin päällysrakenne, jossa on ulokkeita jotka vastapuolen tiivistysrakenteiden kanssa muodostavat labyrintin (kuvio 52). (Toivanen 1999, 34.)



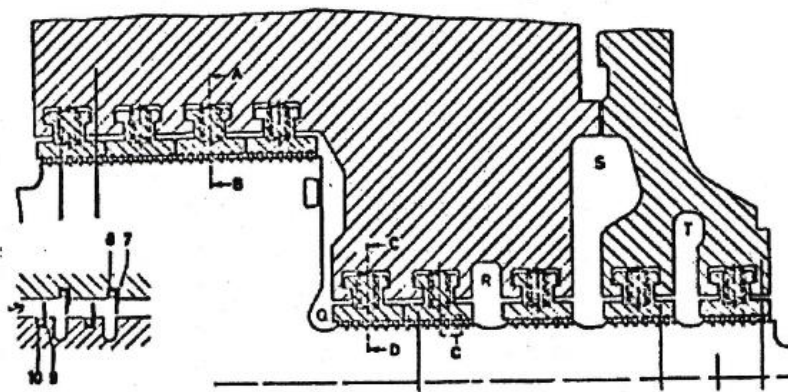
Kuvio 52. Reaktiovyöhykkeen labyrinttitiivistys (Littler 2013).

Turbiinin akselin ulosvienneissä käytetään labyrintti- tai hiilirengastiivistettä. Akselin labyrinttitiivistyksessä (kuvio 53) on oltava riittävästi tilaa sekä aksiaali- ja radiaalisuunnassa lämpölaajenemisen sallimiseen. Hiilirengastiivisteessä on useita osiin jaettuja renkaita, joita jousi kiristää turbiiniakselia vasten. Hiilirengastiivistyksen käyttöä rajoittaa höyryn lämpötila. (Toivanen 1999, 34-35.)



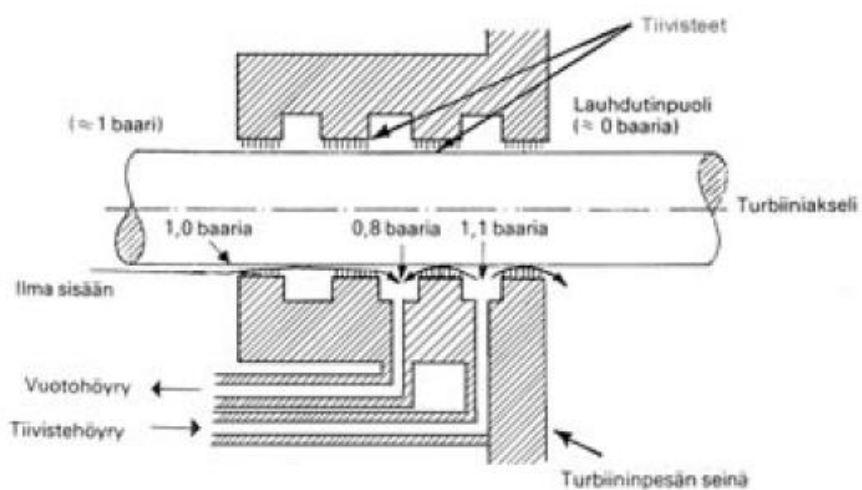
Kuvio 53. Akselin labyrinttitiiviste. Turbiiniakselissa on tiivisteiden uria vastaavat urat, jotka muodostavat tiivistyslabyrintin (Bloch & Singh 2009).

Höyry paisuu tiivisteiden raossa. Määrä on sitä pienempi, mitä pienempi on höyryn paine. Rakoja tehdään useita kymmeniä peräkkäin. Koska samalla höyryvirralla ennen pitkään saavutettaisiin kriittinen nopeus, eivät seuraavat tiivisteet enää auttaisi. Tämän vuoksi tiivisteet järjestetään ryhmiin, joiden välistä otetaan väliottoja (kuvio 54), jotka johdetaan sopivaan paikkaan käytettäväksi hyväksi esilämmittimissä keskipaine- ja matalapaineturbiineissa. Viimeisestä ulosotosta höyry johdetaan vuotohöyryn lauhduttimeen tai ulkoilmaan. (Toivanen 1999, 34.)



Kuvio 54. Korkeapaineturbiinin akselitiivistysjärjestelmä. Väliotot merkitty kirjaimilla Q, R ja S. T on vuotohöyryn kanava (Toivanen 1999, 34).

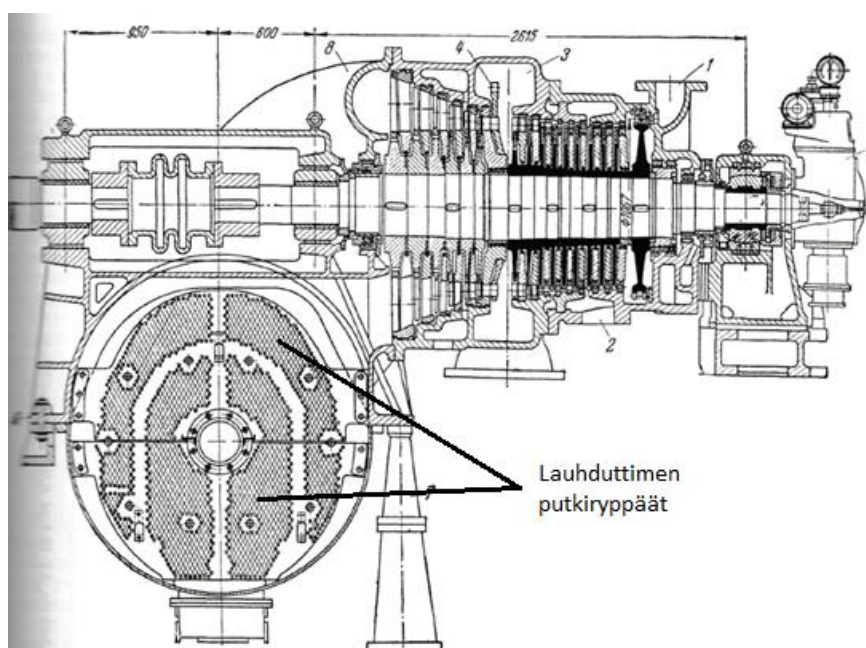
Turbiinin matalapainepuolella ja lauhduttimessa vaikuttaa normaalia ilmanpainetta matalampi paine, joten ulkoilma pyrkii virtaamaan näihin matalapaineisiin osiin akselin ja tiivistyksen välistä. Tätä estetään käyttämällä tiivistehöyryä. Tiivistehöyry on höyryä, jonka paine on ulkoista ilmanpainetta korkeampi. Tämä höyry johdetaan labyrinttitiivistykseen omaan lohkoonsa, jolloin se estää ulkoilman vuotamisen turbiinin rakenteisiin (kuvio 55).



Kuvio 55. Turbiinin tiivistehöyryjärjestelmän toimintaperiaate (Huhtinen 2013).

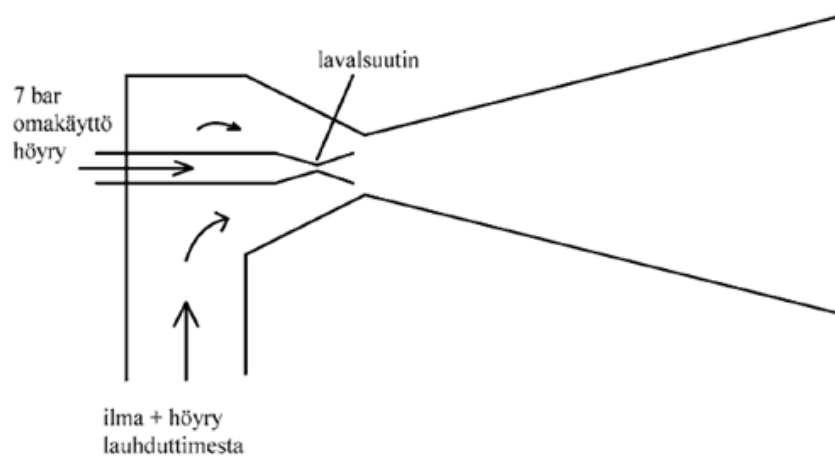
13 Lauhdutin

Lauhduttimen tarkoitus on muuttaa matalapaineturbiinilta tuleva höyry jälleen vedeksi, joka siirretään taas eteenpäin laitoksen vesi-höyrypiirin kiertoon. Lauhduttimen lukuisissa putkiryppäissä virtaa jäähdytysvesi ja höyry lauhtuu näiden kylmien putkien pinnoilla. Jäähdytysputkien pinnoille muodostuva lauhdekalvo valuu painovoiman vaikutuksesta alas ja tämän jälkeen se pumpataan lauhdepumpuilla eteenpäin prosessikiertoon. Lauhdutin sijoitetaan välittömästi matalapaineturbiinin jälkeen, sen alapuolelle (kuvio 56) ja tuetaan turbiinilaitoksen perustaan suurilla kierrejousilla. (Huhtinen 2013, 100.)



Kuvio 56. Turbiinin ja lauhduttimen rakenteet (Shlyakhin 2005).

Lauhduttimen paine pyritään pitämään mahdollisimman alhaisena, jolloin höyryn paisunta turbiinissa jatkuu pitempään ja siitä saadaan enemmän energiaa turbiinin loppupään siivistöissä. Alipaine lauhduttimessa saadaan aikaiseksi höyrykäyttöisillä ejektoreilla (kuvio 57) tai vesirengaspumpuilla (Huhtinen 2013, 100).



Kuvio 57. Hörykäyttöisen ejektorin toimintaperiaate (Huhtinen 2013).

14 Häviöt

Turbiinia suunniteltaessa kaikkien mahdollisten häviöiden tunteminen on erittäin tärkeää hyötysuhteen ja ongelmattoman toiminnan kannalta. Kun häviöt tunnetaan, ne voidaan suunnittelussa ottaa tarkemmin huomioon ja pyrkiä eliminomaan mahdollisimman pieniksi. Häviöt voidaan jakaa sisäisiin ja ulkoisiin häviöihin. Sisäiset häviöt aiheutuvat höyryn käyttäytymisestä turbiinin sisäisissä rakenteissa. Ulkoiset häviöt ovat pääasiassa mekaanisia häviöitä, lämpöhäviöitä säteilyn ja johtumisen kautta sekä tiivistehäviöitä turbiinin rakenteista ulkoilmaan. (Toivanen 1999, 38.)

14.1 Sisäiset häviöt

Turbiinin sisäisiin häviöihin luetaan suutinhäviöt, siivistöissä tapahtuvat häviöt, poistumishäviöt, pyöräkitkahäviöt sekä vuotohäviöt.

Suutinhäviö kasvaa suuttimen pintojen kulumisen, niihin syntyvien suolakerrostumien ja ruostumisen takia. Suuttimena voidaan ymmärtää myös turbiinivyöhykkeiden johtosiipien pinnat. Nämä pinnan epätasaisuudet saavat aikaan kasvannutta kitkaa virtauksessa, joka aiheuttaa höyryvirtauksen pyörteilyä ja entropian lisääntymistä, jolloin höyryn alkuperäinen työkyky pienenee. (Toivanen 1999, 37.)

Siivistöhäviöissä virtaushäviöt aiheuttavat höyryvirtauksen nopeuden pienenemisen turbiinivyöhykkeiden johto- ja juoksusiivistöissä. Siivistöhäviöihin luetaan seuraavat häviöt:

- kitkahäviöt, joita aiheuttavat siipien pinnan laatu ja siipien leveys. Siiven virtauspinta-ala pyritään tekemään niin kapeaksi kuin vaan höyryn riittävä ohjaus mahdollistaa
- sysäyshäviö, joka johtuu höyryvirtauksen törmäyksestä siiven tuloreunaan, sekä siitä ettei höyry virtaa siipeen tangentin suunnassa. Tätä häviötä kompensoidaan tekemällä siiven reuna terävämmäksi
- pyörrehäviö, joka aiheutuu juoksupyörän pidemmästä siipikanavan rakenteesta kuin vastaava johtokanava on valmistusepätkäarkkuuksien takia.

Tämä aiheuttaa höyryvirtauksessa pyörteilyä höyryn täyttäessä tyhjää tilaa

- suunnanmuutoshäviö, jonka aiheuttaa höyryvirtauksen kääntyminen siipisolissa. Virtauksen kääntyminen aiheuttaa höyryn sisäistä kitkaa eri virtaussäikeiden nopeus- ja paine-erojen takia. (Toivanen 1999, 37-38.)

Höyryn poistuessa juoksusiivistöstä sillä on tietty nopeusenergia. Tämä nopeusenergia on sitä paremmin hyödynnettävissä seuraavassa turbiinivaiheessa, mitä pienempi välys vaiheiden välillä on. Välyksen kasvaessa höyryn pyörteily lisääntyy ja sen sisäinen kitka aiheuttaa höyryn työkyvyn alenemista. Tätä kutsutaan poistohäviöksi. (Toivanen 1999, 38.)

Pyöräkitkahäviö aiheutuu juoksupyörän ja sen kammiossa olevan höyryn välistä kitkasta. Tämän häviön suuruus riippuu pyörimisnopeudesta, höyryn arvoista, juoksupyörän halkaisijasta ja pinnankarheudesta. (Toivanen 1999, 38.) Häviö lisää höyryn entalpiaa kitkan vaikutuksella, mutta tämä energia on suoraan pois turbiinin akselitehosta (Littler 2013, 13).

Vuotohäviöllä tarkoitetaan höyryn vuotoa turbiinivyöhykkeiden välillä, jolloin höyry karkaa pienempipaineiseen jaksoon luovuttamatta energiaa akselille. Vuotohäviön suuruuteen vaikuttaa vuotoraon pinta-ala, jaksojen välinen paine-ero ja höyryn tiheys. (Toivanen 1999, 38.) Vuotohäviö on suurempi reaktioturbiineissa kuin aktioturbiineissa johtuen paineenmuutoksesta myös johtosiivistössä. Tästä johtuen on syytä kiinnittää suurta huomiota reaktioturbiinin siivistöjen tiivistykseen. (Littler 2013, 12.)

14.2 Ulkoiset häviöt

Turbiinin mekaanisiin häviöihin kuuluvat laakeri- ja tiivistekitka, öljypumpun ja säätölaitteiston tehontarve sekä mahdollisen alennusvaihteiston käyttö turbiinin ja käyttölaitteen välillä. Suurimman mekaanisen häviön aiheuttaa öljyjärjestelmän tarvitsema teho. (Toivanen 1999, 38.)

Turbiinista häviää lämpöä säteilyn ja johtumisen kautta. Tämä lämpöhäviö riippuu käytetyn höyryn lämpötilasta ja koneen eristyksistä. Turbiinin toiminnan kannalta tämä häviö on yleensä merkityksetön. (Toivanen 1999, 38.)

Turbiinin akselin ja pesien päätyjen välisestä labyrinthitiivistyksestä on mahdollista vuotaa höyryä ulos. Tätä kutsutaan tiivistehäviöksi ja sen suuruus riippuu höyryn paineesta, tiivisteiden lukumäärästä, akselin halkaisijasta ja tiivisteiden laadusta. (Toivanen 1999, 38.)

15 Pohdinta

Tässä opinnäytetyössä perehdyttiin höyryturbiineiden toimintaperiaatteisiin, niiden erilaisiin rakenteisiin sekä keskeisiin suunnitteluperusteisiin. Työn tavoitteena oli antaa selkeä kuva höyryturbiineiden toiminnasta sekä näihin lämpövoimakoneisiin liittyvistä tärkeimmistä suunnitteluperusteista.

Työn tekemiseen vaadittua laajaa teoreettista tietoa alettiin hankkia jo vuoden 2014 kesästä lähtien. Turbiinitekniikkaan liittyvää kirjallisuutta löytyi todella hyvin sekä teoreettisen tiedon lisäksi höyryturbiinin toimintaa ja erilaisia komponentteja tarkasteltiin myös voimalaitosympäristössä. Turbiinitekniikka alana on erittäin laaja sekä monipuolinen ja sisältää kaikkia osa-alueita perinteisistä insinööritieteistä. Näistä tärkeimpänä mainittakoon termodynamiikka, virtausoppi, materiaaalitekniikka, lujuusoppi sekä perinteinen- ja värähtelymekaniikka.

Opinnäytetyöprosessin tuloksena syntyi teoreettinen työ jossa tarkasteltiin lähtötavoitteiden mukaisia osa-alueita ja syvennyttiin turbiinitekniikan perusteisiin. Työtä aloittaessani näkemys työn mahdollisesta laajuudesta oli paljon laajempi mitä lopullinen työ tuli olemaan. Työtä tehdessä haasteeksi muodostui ammattikorkeakoulun opinnäytetyölle asetettu työmäärä, joka edellytti rajaamaan aihepiiriä ja tarkastelemaan keskeisimpiä näkökulmia aiheesta tämän työn toteutusta varten. Vaikka aihepiiriä joutui rajaamaan, niin lähtökohtaisesti tunnen saavuttaneeni tavoitteet joita tälle työlle asetin. Työn edetessä löysin myös uusia näkökulmia aiheeseen ja ne päätyivät lopulliseen työhön.

Jos aloittaisin saman prosessin nyt uudestaan, niin keskittyisin johonkin turbiinitekniikan sisäiseen aihepiiriin, kuten materiaaalitekniikkaan tai värähtelymekaniikkaan tarkemmin syventyen kuin turbiinitekniikkaan kokonaisuudessaan. Laajasta aihepiiristä huolimatta pystyin tässä työssä esittämään turbiinitekniikan keskeisimmät perusteet aina toimintaperusteista materiaaalitekniisiin ratkaisuihin.

Aloittaessani opinnäytetyöprosessia, tietoa turbiini- ja voimalaitostekniikasta oli kertynyt minulle jo hyvin ja tämä tietomäärä syveni voimakkaasti opinnäytetyöprosessin sekä raportoinnin edetessä. Työn myötä sain myös näkökulmaa värähtelymekaniikkaan, terästen vaurioitumismekanismeihin sekä voimalaitosten ja turbiineiden materiaaalitekniisiin vaatimuksiin. Itse raportointiprosessi kehitti omalla kohdallani kykyä sisäistää ja tuottaa tieteellistä tekstiä. Toivon, että tämä

työ tarjoaa tietoa turbiinitekniikasta kiinnostuneille ja näiden koneiden kanssa työskenteleville henkilöille. Uskon tästä työstä olevan myös hyötyä tulevalle uralleni tai mahdollisille jatko-opinnoilleni.

Lähteet

- Bloch, H. & Singh, M. 2009. Steam Turbines Design, Applications and Re-rating. New York: The McGraw- Hill Companies
- Dresser –Rand. 2016. Products+ Solutions Steam Turbine. Dresser –Rand. <http://www.dresser-rand.com/products-solutions/steam-turbines/>. 12.1.2016.
- Electropaedia. 2005. Steam Turbine Electricity Generation Plants. Woodbank Communications Ltd. http://www.mpoweruk.com/steam_turbines.htm. 3.1.2016.
- GE Power Generation. 2016. Products: Steam Turbines. GE Power Generation. <https://powergen.gepower.com/products/steam-turbines.html>. 2.1.2016.
- Huhtinen, M. 2013. Voimalaitostekniikka. Helsinki: Opetushallitus.
- Kingsbury Inc. 2016. Kingsbury Pivoted Shoe Journal Bearings. Kinsbury Inc. <http://www.kingsbury.com/pdf/catalog-PJ.pdf> . 5.2.2016.
- Larjola, J. 2008. Energianmuuntoprosessit syksy 2008- luentomoniste. Lap-
peenrannan teknillinen yliopisto. [julkaisematon materiaali].
- Littler, D. 2013. Turbines, Generators and Associated Plant: Incorporating Modern Power System Practice. Amsterdam: Elsevier.
- Nygren, V. 1964. Höyrykattilat ja- koneet. Helsinki: Otava.
- Pollak, H., Pfitzinger, E-W., Thamm, N. & Schwarz, M-A. 2016. Design And Materials For Modern Steam Turbines With Two Cylinder Desing Up To 700 MW. Siemens AG Power Generation Germany. http://www.energy.siemens.com/nl/pool/hq/energy-topics/pdfs/en/steam-turbines-power-plants/3_Design_and_Materials.pdf. 11.2.2016.
- Shlyakhin, P. 2005. Steam Turbines Theory and Design. Honolulu: University Press of the Pacific.
- Singh, O. 2006. Applied Thermodynamics. New Delhi: New Age International.
- Stork Turbo Blading. 2016. Steam Turbine Blades, Stellite Brazing. <http://www.storkturboblading.com/steam-turbine-blades>. 16.2.2016.
- Toivanen, M.1999. Höyryturbiini. Fortum koulutusmateriaali. [julkaisematon materiaali].

Turunen-Saaresti, T. 2008. Turbiinilaitos. TVO koulutusmateriaali. [julkaisematon materiaali].